ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ РАДИОТЕХНИКА

Л. В. Кубаркин и Е. А. Левитин

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ



РАДИОТЕХНИКА

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ



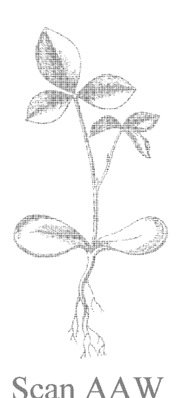
МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 454

Л. В. КУБАРКИН и Е. А. ЛЕВИТИН

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ РАДИОТЕХНИКА

Издание второе, переработанное и дополненное





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

«Занимательная радиотехника» представляет собой сборник примеров из самых различных областей радиотехники, в занимательной форме иллюстрирующих физическую сущность процессов в радиотехнических устройствах и взаимосвязь радиотехники с другими областями науки и техники.

Книга предназначена для радиолюбителей, интересующихся современным состоянием радиотехники и желающих постичь физическую сущность процессов и явлений, используемых в радиотехнической аппаратуре. Однако книга не ставит задачи систематического изложения курса радиотехники.

«Занимательная радиотехника» рассчитана на читателя, интересующегося техникой и физикой и обладающего знаниями в объеме средней школы.

6Ф2 *Кубаркин Леонтий Владимирович и Левитин Ефим Алексеевич*
К88 **Занимательная радиотехника.** Изд. 2-е, переработ. и дополненное. Госэнергоиздат, 1962.
264 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 454). 6Ф2

* * *

Рисунки художников В. П. Стрельникова и К. А. Павлинова.

Редактор *Б. Х. Кривицкий* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в набор 16/VI 1962 г. Подписано к печати 7/IX 1962 г.
Т-10919 Бумага $84 \times 108^1/_{32}$ 13,53 печ. л. Уч.-изд. л. 13,6
Тираж 50 000 экз. Цена 65 коп. Зак. 2408

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ОТ АВТОРОВ

«Занимательная радиотехника» не преследует цели систематического изложения основ радиотехники и не призвана подменить собой учебники. Она подобно другим книгам этого жанра, введенного в литературу Я. И. Перельманом, ставит своей основной задачей пробудить у читателя вкус к изучению науки и техники, способствовать развитию у него технического и научного мышления, привить навыки уяснения физической сущности явлений.

Для достижения этой цели в «Занимательной радиотехнике» рассматриваются отдельные узловые вопросы радиотехники и связанных с ней областей электротехники и физики, а их сущность, значение и смысл раскрываются на примерах, по возможности тесно связанных с практикой и поэтому легче усваиваемых и запоминающихся.

Для лучшего раскрытия физической сути этих вопросов и придания изложению большей занимательности они зачастую рассматриваются под не совсем обычным углом зрения. Это облегчает понимание явлений, способствует укреплению и расширению имеющихся у читателя знаний о взаимосвязи различных областей науки и техники, что является одной из обязательных основ политехнического обучения.

Для придания книге занимательности в число рассматриваемых вопросов включено много таких, которые издавна привлекали к себе внимание радиолюби-

телей, но тем не менее не всегда получали достаточно всестороннее освещение в печати.

В тексте книги введены многочисленные примеры как из области радиотехники, так и из других областей знания (а нерёдко и из быта), причем примеры эти подобраны так, что связанные с ними подсчеты и числовые сопоставления дают интересные и подчас неожиданные результаты.

Основным затруднением, с которым авторы постоянно сталкивались и которое им не удалось сколько-нибудь полно преодолеть, является известный разнобой в степени трудности рассматриваемых вопросов. Но все же, как правило, подбор материала производился с ориентировкой на среднего радиолюбителя, интересующегося физическими основами радиотехники. Известная часть материала, возможно, будет интересна не только радиолюбителям, но и студентам радиотехнических вузов и техникумов, а также радиоспециалистам.

Авторы будут признательны читателям за все отзывы о книге, подборе материала, форме изложения и пр. Отзывы следует направлять в адрес издательства: Москва, Ж-114, Шлюзовая наб. 10, Госэнергоиздат.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Радиолитература у нас вообще не может пожаловаться на отсутствие внимания со стороны читателей. В особенности это относится к массовой литературе, рассчитанной на широкого читателя. Поэтому неудивительно, что такая книга, как «Занимательная радиотехника», претендующая на несколько необычный подход к подбору материала и способу его изложения, вызвала большой поток откликов.

В подавляющем большинстве эти отклики были положительными.

Выбранный авторами уровень изложения большинство читателей признало правильным.

Поэтому общий характер второго издания «Занимательной радиотехники» не изменился. Книга переработана, из нее изъято более трети материала и заменено новым, более современным. В оставленный от первого издания материал внесены оказавшиеся нужными коррективы и дополнения.

Материал для второго издания подбирался и обрабатывался по-прежнему так, чтобы книга оказалась подходящей по уровню наиболее широкому кругу читателей.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ В КНИГЕ СОКРАЩЕНИЙ

а — ампер
а·ч — ампер-час
в — вольт
вт — ватт
г — грамм
гн — генри
гц — герц
дб — децибел
кал — калория
ккал — килокалория
кв — киловольт
квт — киловатт
кг — килограмм
кгц — килогерц
км — километр
км/сек — километр в секунду
ком — килоом
к. п. д. — коэффициент полезного действия
к — кулон
л — литр
м — метр
м^2 — квадратный метр
м^3 — кубический метр
ма — миллиампер
мв — милливольт
мес. — месяц
мин — минута
Мг — мегагерц
мк — микрон
мка — микроампер
мкв — микровольт
мкф — микрофарада
мм — миллиметр
млрд. — миллиард
млн. — миллион
мм^2 — квадратный миллиметр
мм^3 — кубический миллиметр
Мом — мегом
м/сек — метр в секунду
пф — пикофарада
сек — секунда
см — сантиметр
см^2 — квадратный сантиметр
см^3 — кубический сантиметр
УКВ — ультракороткие волны
ф — фарада
ч — час
э. д. с. — электродвижущая сила
°С — градус Цельсия

СОДЕРЖАНИЕ



Многие из современных приборов и устройств имеют в своем названии слово электронный: электронная лампа, электронное телевидение, электронный микроскоп, электронное реле. Примеров можно привести множество. Особенно часто слово электронный связывается с радиотехническими терминами. И даже само название радиотехника все чаще заменяют другим — радиоэлектроника.

Чем же это объясняется?

Мы знаем, что электроны являются важнейшей составной частью вещества. Если бы название «электронный» присваивалось на этом основании, то без него оставалось бы не так-то много слов.

Не может ли иметь значение то, что все электронные устройства, приборы и системы являются по сути дела электрическими, а электрический ток представляет собой упорядоченное перемещение электронов? Нет! Ответ может быть только отрицательный. Никому не придет в голову назвать электрический утюг или электровоз электронным, хотя не подлежит сомнению, что в основе их работы лежат электронные процессы.

Термин «электронный» в современной науке и технике применяют по отношению к тем приборам и устройствам, которые являются электрическими и в основу которых положено управление электрическими зарядами. Оно весьма значительно отличается от управления движением зарядов в проводниках и обладает многими важнейшими особенностями.

Что же мы знаем об электроне?

Мы привыкли читать и говорить, что молекула мала, но мы никогда не представляем себе, насколько она в действительности потрясающе мала. У нас нет для этого масштабов. Молекула — это не кирпич в сравнении с огромным зданием и даже не пылинка, сопостав-

ленная с величайшим небоскребом. Это «еще гораздо меньше».

Возьмем каплю воды. Капля — практически наименьшая мера жидкости, которой мы пользуемся в обиходе. Считать на капли нам приходится разве только при отмеривании лекарств. Но в капле воды заключено невообразимо большое количество молекул. Только море может позволить нам постигнуть его.

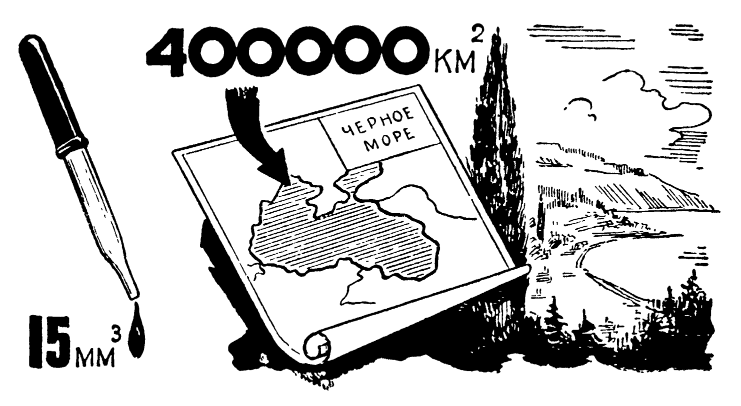
На благодатном юге нашей Родины раскинулось теплое Черное море. Его площадь равна примерно 400 000 *км*^{2}, а глубина его в среднем достигает 750 *м*.

Много ли капель в Черном море?

Конечно, подобный вопрос кого угодно поставит в тупик. Нескоро сообразишь, сколько капель, скажем в стакане воды, а тут целое море! Больше чем тысяча километров отделяет его восточные берега от западных. Неоглядные дали, покрытые водой.

Не будем пытаться угадать, сколько капель в Черном море. Возьмем карандаш и бумагу и попробуем найти интересующее нас число. Примем, что объем капли воды равен 15 *мм*^{3}. Тогда, исходя из площади поверхности моря и его глубины, найдем, что в нем содержится что-то около $2 \cdot 10^{22}$ капель воды.

Это число огромно. Оно послужит нам для перевода одного масштаба в другой, потому что в одной капле воды содержится примерно столько же молекул, сколько капель в Черном море. Закройте глаза и представьте себе бесконечное множество капель, из которых оно состоит. Столько же молекул в одной капле. Как же мала



должна быть эта самая молекула, чтобы в маленький объем капли воды их вместилось такое баснословно большое количество.

Этот пример поможет, пусть с трудом, но все же представить себе, сколь ничтожны размеры молекулы и как непомерно много молекул даже в невидимой пылинке.

И в то же время молекула далеко не «самое маленькое». В ультрамикроскопическом мире тех «кирпичиков», из которых построен мир, молекула может считаться гигантом. Ее структура сложна, часто даже очень сложна. Молекула сама состоит из более простых образований — атомов.

Вот булавочная головка. Мы часто приводим ее в пример, когда хотим подчеркнуть малые размеры чего-нибудь. Тогда мы говорим: «с булавочную головку».

Булавочная головка меньше капли воды, но в ней все же заключено 10^{19} атомов железа.

С чем можно сравнить это число? От Земли до Солнца 150 млн. *км.* Переведем километры в миллиметры, получим $1{,}5 \cdot 10^{14}$ *мм.* Это число грандиозно, но все же, если мы распределим атомы из булавочной головки на пути от Земли до Солнца, то на каждом его миллиметре оказалось бы ... по полмиллиона атомов. Представьте себе бесконечную вереницу кучек по полмиллиона атомов от Земли до Солнца и все эти атомы из одной булавочной головки. Вот как мал атом!

Но ведь это все еще не электрон. Это сложное образование — атом. Электрон еще меньше. В атоме железа, из которого сделана булавочная головка, 26 электронов. Если все электроны булавочной головки растянуть цепочкой с интервалом 1 *мм*, то такая цепочка электронов протянется от Земли в безбрежные дали космического пространства на такое расстояние, какое свет пролетает за 26 световых лет. Это далеко даже в космических масштабах. Ведь ближайшая звезда (Проксима в созвездии Центавра) находится от Земли на расстоянии всего в четыре световых года. А 26 световых лет — это расстояние, на котором находится от Земли яркая и красивая звезда Вега из созвездия Лиры.

Вот в какие страшные дали завела нас булавочная головка!

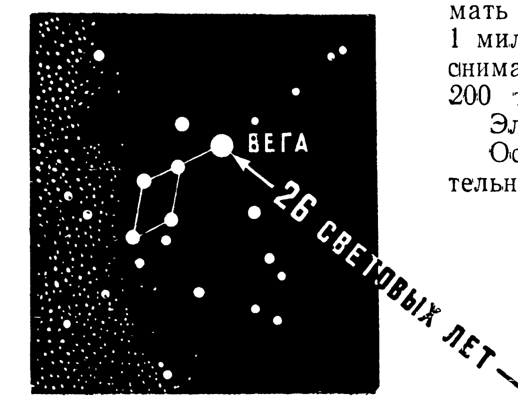
Что же представляет собой электрон и какие число-

вые характеристики определяют его физические свойства?

Электрон является частицей, имеющей наименьший электрический заряд. Заряд электрона считается наименьшим возможным количеством электричества только потому, что до сих пор ни разу не приходилось наблюдать меньшего заряда, хотя современная техника эксперимента позволяет обнаружить и измерить меньшие заряды. Заряд электрона измерен много раз разными способами. Он оказался равным $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц, или $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ кулона.

Эта величина представляет для радиотехников особый интерес, так как им постоянно приходится иметь дело с электрическими потенциалами и электрическим током. А электрические потенциалы связаны со скоплением электронов (или других зарядов) в одном месте и их недостатком в другом. Что же касается электрического тока, то он представляет собой движение зарядов. При токе 1 *а* за 1 *сек* через поперечное сечение проводника протекает 1 *к* электричества, т. е. $6{,}3 \cdot 10^{18}$ электронов.

Число электронов в кулоне баснословно велико. Если зарядить какое-нибудь тело отрицательным зарядом 1 *к* и потом начать снимать с него электроны по 1 миллиону в секунду, то снимать их придется... 200 тыс. лет.



Электрон имеет массу. Остроумные и изумительные по своей тонкости эксперименты позволили физикам не только измерить заряд электро-

на, но и определить его массу. Она оказалась равной $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ *г*. Эта величина чрезвычайно мала. Но все же масса электрона не равна нулю, и, помножив число электронов в кулоне на только что приведенную величину, получим, что кулон имеет массу $5{,}7 \cdot 10^{-9}$ *г*. Кулон нельзя «взвесить» даже на самых лучших микроаналитических весах, чувствительность которых равна миллионным долям грамма.

Интересно получить хотя бы какое-нибудь представление о величине электрона. Нельзя примитивно считать электрон каким-то подобием шарика или телом какой-либо иной формы. Но все-таки некоторые цифры, характеризующие размеры электрона, имеются. Следует только правильно понимать их. Под размерами электрона понимают не его границы, как какого-то твердого тела, а тот объем, в пределах которого сильно проявляются свойства электрона и приближение к которому уже можно считать соударением с электроном. Такой объем имеет поперечник около 10^{-5} ангстрема, или $1{,}2 \cdot 10^{-13}$ *см* [ангстрем (Å) $= 10^{-8}$ *см*]. Как и всегда, эту величину нельзя представить себе без сопоставления. Есть огромная единица — световой год. Расстояние от Земли до Солнца всего только 8,5 световой минуты. Так вот: диаметр электрона примерно во столько же раз меньше метра, во сколько раз метр меньше светового года.



Мы считаем электрон частицей вещества, одной из наименьших элементарных частиц. Такие характеризующие электрон величины, как масса, размеры, по своей сути подтверждают представление о том, что электрон является каким-то микроскопическим «тельцем». Но са-

ДИАМЕТР ЭЛЕКТРОНА 10^{-13}
1 МЕТР
СВЕТОВОЙ ГОД 10^{+14}

мые тщательные исследования показали, что в некоторых случаях «поведение» электрона таково, что его приходится считать не частицей, а волной со всеми присущими ей свойствами, в том числе и длиной. Длина волны электрона зависит от скорости его движения. При тех скоростях, с какими фактически приходится иметь дело, длина волны электрона примерно такая же, как у рентгеновых лучей, т. е. 0,005—0,000005 *мк*.

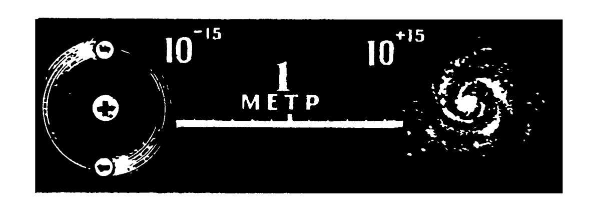


Следует предостеречь от одной ошибки, которую часто делают, считая, что волны электрона являются электромагнитными волнами. Это не электромагнитные волны, это волны иного порядка, природа которых пока неясна. Они носят название дебройлевских волн (по имени французского физика Де-Бройля). Волновыми свойствами обладают не только электроны, но и все другие элементарные частицы и даже все вообще движущиеся тела. И Вы, читатель, если идете, то приобретаете волновые свойства, однако длина Вашей волны крайне мала, так как длина дебройлевских волн тем меньше, чем больше масса движущегося объекта и чем меньше его скорость.

Однако электрон может быть также источником и электромагнитных колебаний. Это происходит, например, при его торможении. Энергия электрона тем больше, чем быстрее он движется. Указанная выше масса электрона есть масса его покоя. Масса движущегося электрона возрастает со скоростью. Если электрон тормозится, то его энергия уменьшается. Излишек энергии может быть отдан в виде излучения электромагнитных колебаний.

Несколько слов о взаимодействии электрона с полями. Электрон имеет массу и поэтому взаимодействует

с гравитационным полем. Но «вес» электрона так мал, что с ним практически не приходится считаться. Вокруг электрона существует электрическое поле. Находясь в постороннем электрическом поле, электрон движется по направлению его линий в сторону положительных зарядов. У неподвижного электрона магнитного поля нет и с постоянным магнитным полем он не взаимодействует. Вокруг движущегося электрона образуется магнитное



поле. Движущийся электрон взаимодействует с магнитным полем. Это взаимодействие сказывается в виде изменения направления движения электрона.

Пытаясь составить себе какое-то представление об электронах и других элементарных частицах, не следует забывать того, что они находятся где-то на грани тех масштабов, которые так или иначе достигнуты имеющимися в нашем распоряжении средствами познания окружающего мира. Микромир элементарных частиц отстоит от привычных нам размерностей примерно на 15 порядков. Действительно, если размеры электрона увеличить на 15 порядков, то получится величина примерно около 1 *м* — самая привычная единица размерностей нашего быта. Примерно во столько же раз отличается от метра предел нашего проникновения в мегамир галактик и звездных образований.

Эти рубежи, по-видимому, характеризуются не только определенным изменением масштабов, но и качественными изменениями взаимосвязей, иными закономерностями. Примером таких неожиданных взаимосвязей могут служить хотя бы могучие внутриядерные силы, удерживающие рядом и крепко цементирующие частицы с одинаковым зарядом, испытывающие вследствие этого огромные силы отталкивания. Видимо, некоторые «наши» законы природы, законы наших масштабов перестают действовать и в мегамире звездных скоплений.

Поэтому не будем считать электрон примитивным «шариком», простейшим кирпичиком мироздания. Структуру электрона мы еще не знаем, но уже очевидно, что он тоже сложен. Электрон находится сегодня на пределе выявленных нами рубежей в структуре мира. Мы пока не знаем, что делается еще дальше в глубине материи за этими рубежами.

Но наши познания микромира непрерывно расширяются и углубляются и пределы познанных нами и поставленных на службу человеку масштабов непрерывно раздвигаются.

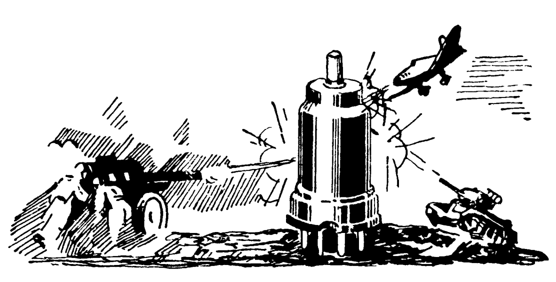


Огромное количество атомов, содержащихся даже в самом незначительном объеме любого вещества, заставляет думать, что элементарные частицы, из которых оно состоит, плотно спрессованы.

Можно привести много примеров, которые подтверждают эту мысль. Вот перед нами радиолампа. Из ее стеклянного или металлического баллона со всей тщательностью выкачан воздух. Несметные полчища молекул воздуха яростно бьются снаружи о стенки баллона, стремясь прорваться внутрь. Каждый квадратный сантиметр поверхности баллона при комнатной температуре испытывает в секунду 10^{22} ударов от окружающих лампу молекул воздуха, несущихся со скоростью 1 500 *км/ч*. Однако тонкие стенки баллона успешно противостоят этому сверхураганному обстрелу. Ни малейшей щелки не могут найти в них молекулы воздуха.

Это невольно заставляет думать, что элементарные частицы, из которых состоит вещество, сложены так же плотно, как, скажем, кирпичи в стене.

Посмотрим, как обстоит дело в действительности. Для этого обратимся снова к булавочной головке и прежде всего заметим некоторые нужные нам цифры:



поперечник электрона примем равным 10^{-5} Å (1 Å$=10^{-7}$ *мм*); поперечник атомного ядра в среднем составляет 10^{-4} Å, а поперечник атома — около 1—2 Å. Поперечник булавочной головки примем равным 1,3 *мм*, т. е. $1{,}3 \cdot 10^{-7}$ Å, а число атомов в ней, как уже указывалось, 10^{19}.

Увеличим булавочную головку до размеров земного шара. Диаметр земного шара равен в круглых цифрах 13 000 *км*, т. е. $13 \cdot 10^{9}$ *мм*. Значит, булавочную головку, имеющую в поперечнике 1,3 *мм*, надо увеличить в 10 млрд. (10^{10}) раз, чтобы она сравнялась по величине с земным шаром.



Какой же величины достигнет при таком увеличении атом? Поперечник атома примерно равен 1Å, т. е. 10^{-10} *м*. При увеличении в 10 млрд. раз его поперечник станет равным 1 *м*. В результате такого увеличения мы получим метровую модель атома, размер которой нам представить себе нетрудно. Это шар окружностью в два обхвата.

Сколь же велики при подобном увеличении будут атомные ядра и электроны?

Поперечник атомного ядра равен примерно 10^{-4} Å, или 10^{-11} *мм*. При увеличении в 10^{10} раз ядро атома достигнет величины 0,1 *мм*. Точка, стоящая в конце этой фразы, имеет в диаметре около 0,5 *мм*; значит, диаметр атомного ядра будет в 5 раз меньше. Это — толщина волоса.

Удастся ли увидеть ядро в такой мегровой модели атома? При хорошем боковом освещении и на соответствующем фоне люди с хорошим зрением смогут различить его. Ведь мы различаем в солнечном луче мельчайшие пылинки, невидимые в обычных условиях.

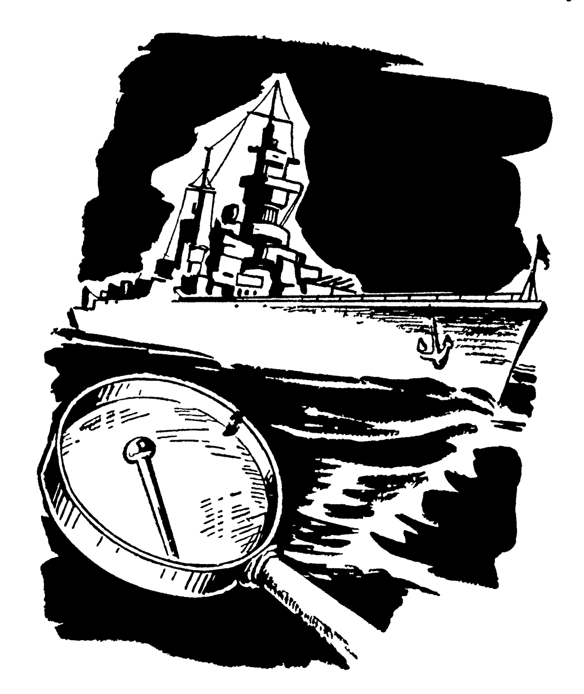
А каким же станет диаметр электрона? Он будет еще в 10 раз меньше. Толщина паутинной нити может дать представление о пеперечнике электрона при увеличении в 10 млрд. раз. Такую «модель» электрона можно увидеть только в лупу.

К чему же мы пришли? В объеме, имеющем форму шара с поперечником 1 *м*, находится едва заметная пылинка, занимающая положение в центре. Вокруг нее на различных расстояниях по определенным поверхностям, как бы по невидимым оболочкам, кружатся 26 электронов, различимых только в лупу. Атом по существу пуст. Вещество в виде ядра и электронов занимает в нем только $\frac{1}{1\,000\,000\,000\,000\,000}$ его объема. Для сравнения можно привести нашу солнечную систему. Она фактически имеет блинообразную форму, но приближенно мы можем представить себе ее в виде шара с поперечником, равным удвоенному расстоянию от Солнца до отдаленнейшей планеты — Плутона, т. е. шара с поперечником 12 млрд. *км*. В этом огромном объеме Солнце, Земля и все другие планеты с их спутниками занимают ничтожное место, но все же отношение части этого объема, занятой веществом, к его пустой части будет в 200 раз больше, чем у атома.

Так как основой структуры всякого вещества является именно атом, то можно сказать, что в телах вещество разбросано незначительными «порциями», находящимися друг от друга на относительно очень большом расстоянии, а все тело в целом состоит главным образом из «пустоты».

Мы не случайно взяли слово «пустота» в кавычки. В обиходе мы считаем пустотой пространство, в котором «ничего нет». Согласно взглядам современного естествознания такой «пустой пустоты» нет. Под словом «пустота» надо понимать физическую среду, в которой действуют различные поля — электрические, тяготения и др., которые обладают способностью переносить энергию и передавать взаимодействие между частицами,

Но мы сделаем вид, что забыли об этом, и будем считать промежутки между частицами в атомах пустотой, поскольку она не имеет массы в общепринятом смысле, не оказывает никакого препятствия движению частиц. А всевозможные сочетания атомов — молекулы и образованные из них тела — еще более «пусты», так как атомы в них не прилегают вплотную друг к другу. В сущности говоря, степенью концентрации атомов в объеме вещества и определяется его масса и то, что мы в обиходе называем его весом. Если бы вещество удалось



спрессовать так, чтобы ядра его атомов сошлись вплотную, то все тела невероятно уменьшились бы в размерах, сохраняя в то же время свой вес. Кубический метр вещества, спрессованного до такой степени, превратился бы в невидимую пылинку, объемом в миллионные доли кубического миллиметра.

Продолжая сравнение с булавочной головкой, можно подсчитать, что если весь материал, из которого построен огромный современный линкор водоизмещением

45 000 *т*, сжать так, чтобы ядра его атомов сошлись, то его вещество займет объем примерно булавочной головки, масса которой, однако, останется прежней. У нас на земле эта «булавочная головка» будет весить 45 тыс. *т*.

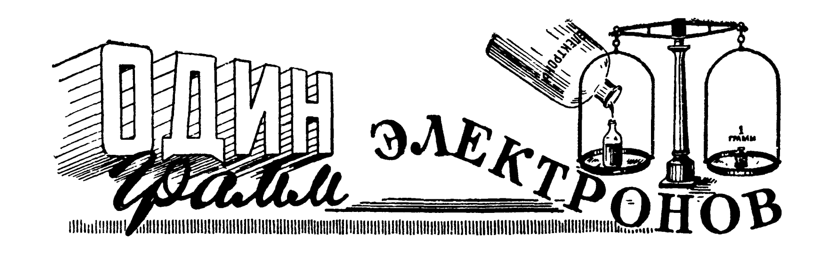
Может быть все это «чистая фантазия»? В природе этого не может быть? Нет, сверхтяжелые вещества, состоящие из спрессованных атомов, в природе существуют. Есть целые звезды, состоящие из такого вещества. Их называют белыми карликами. Одной из них является, например, спутник Сириуса — Сириус-В. Он по размерам сходен с нашей Землей, а масса его равна массе Солнца. Один кубический сантиметр вещества Сириуса-В весил бы на земле 100 *кг*. Один кубический метр этого вещества равен по весу атомному ледоколу «Ленин».

Но это совсем не предел. Есть маленькая звездочка Росс-267. Ее средняя плотность 10 *т* на кубический сантиметр, не 100 *кг*, как у Сириуса-В, а 10 000 *кг*.

Но если вещество по существу представляет собой пустоту, то почему же оно непроницаемо? Почему же молекулы воздуха, бомбардирующие снаружи баллон электронной лампы, не могут проникнуть внутрь?

Самый тонкий слой вещества состоит из столь большого числа атомов, что «посторонние» молекулы не могут пролететь сквозь него, не претерпев многократных столкновений с атомами и не израсходовав в результате этих столкновений всю свою энергию. Пленка металла толщиной 100 атомов уже непроницаема для газа, а стенка металлического баллона лампы имеет толщину около 0,5 *мм*, что соответствует примерно $5 \cdot 10^{10}$ атомам. Дело в том, что для того чтобы претерпеть «столкновение» с атомом, вовсе не нужно «стукнуться» об его ядро. В пространстве, занимаемом атомом, действуют исключительно мощные силы, поэтому для элементарных частиц приближение друг к другу на расстояния, соизмеримые с размерами атома, уже по сути дела представляет собой столкновение со всеми его последствиями.

По мере уменьшения расстояния между ядрами, имеющими одноименные заряды, силы отталкивания между ними увеличиваются. Еще до полного сближения частиц силы отталкивания возрастают настолько, что приближающаяся частица отбрасывается назад или же путь ее движения искривляется.



Числа, связанные с электронами, бывают то фантастически малы, то неимоверно велики. Они настолько отличны от всех привычных нам масштабов, что мы не воспринимает их.

Что нам говорит, например, величина массы электрона: $9 \cdot 10^{-28}$ *г*? Мы не постигаем всю неизмеримую малость этого числа. Чтобы облегчить себе понимание этого, попробуем подсчитать, сколько надо взять электронов, чтобы их общая масса составила 1 *г*. Это сделать просто. Для этого надо взять

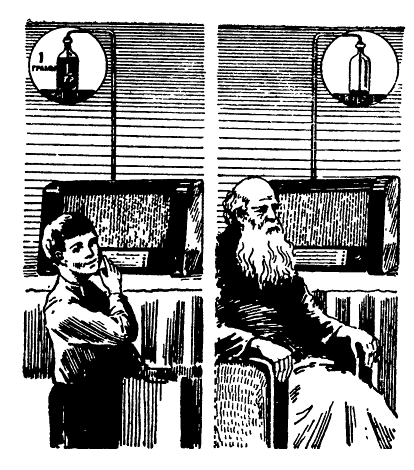
$$\frac{1}{9 \cdot 10^{-28}} \approx 10^{27} \text{ электронов.}$$

Сравним это громадное число с другим, тоже чрезвычайно большим. Мы знаем, что при токе 1 *а* через поперечное сечение проводника в 1 *сек* проходит 1 *к* электричества, или $6{,}3 \cdot 10^{18}$ электронов.

На сколько первое число (10^{27}) превосходит второе ($6{,}3 \cdot 10^{18}$)? Надолго ли хватит 1 *г* электронов, чтобы поддерживать в цепи ток, например, 0,5 *а*, нужный для работы лампового батарейного приемника? Вообразим, что нам удалось раздобыть бутылочку с 1 *г* электронов и что из нее воображаемый насос откачивает электроны и нагнетает их в радиоприемник. Сколько же времени сможет наша чудесная бутылочка питать приемник?

Найдем сначала, сколько секунд 1 *г* электронов сможет поддерживать ток 1 *а*. Для этого число электронов в грамме разделим на число электронов в кулоне:

$$\frac{10^{27}}{6{,}3 \cdot 10^{18}} \approx 1{,}6 \cdot 10^{8} \text{ сек} \approx 44\,000 \text{ ч} \approx 1\,800 \text{ суток.}$$



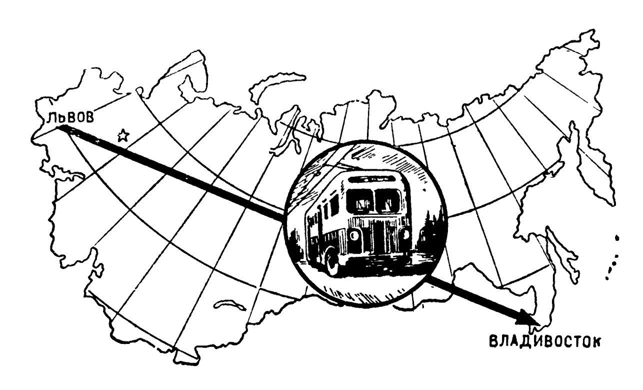
Приемник потребляет 0,5 *а*, следовательно, 1 *г* электронов сможет питать его в течение

$$1\,800 \cdot 2 = 3\,600 \text{ суток} \approx \approx 10 \text{ лет.}$$

Один грамм электронов обеспечит 10 лет непрерывной работы приемника! Таков неожиданный результат нашего подсчета.

Но ведь никто не пользуется приемником непрерывно. Обычно его включают часа на 4 в день. При таком режиме работы запаса питания в чудесной бутылочке с 1 *г* электронов хватит на 6 лет. Можно с полным правом сказать, что столь удачная покупка обеспечит питание приемника на всю жизнь. Если же приемник не ламповый, а транзисторный, то наша бутылочка будет питать его несколько поколений.

Произведем для полноты картины еще один подсчет: сколько времени 1 *г* электронов сможет питать троллейбус? Троллейбус потребляет около 130 *а*. Один грамм электронов обеспечит $\frac{1\,800}{130} = 14$ суток непрерывного движения троллейбуса.





Цифра тоже неожиданно большая, особенно в сопоставлении с длиной пробега троллейбуса. Делая по 40 *км* в час, троллейбус за 14 суток покрыл бы расстояние примерно 13 500 *км*, т. е. проехал бы с запада на восток всю нашу огромную страну. Две недели мчался бы без остановки троллейбус через леса, поля, горы, тайгу, мимо городов, заводов, деревень. Двадцать восемь раз день сменился бы ночью и ночь снова сменилась бы днем, пока, наконец, троллейбус не достиг бы берегов Тихого Океана. И за все это время, за весь этот огромный путь через его мотор прошел бы только 1 *г* электронов.

Кстати, многих может заинтересовать вопрос: в каком же количестве вещества содержится 1 *г* электронов? Можно подсчитать, что, например, 1 *г* электронов содержится в куске железа весом около 4 *кг*.

Скорость движения электронов

Блеснула молния, через несколько секунд раздался удар грома. Нас не удивляет то, что эти явления мы восприняли разновременно. Мы знаем, что звук распространяется не очень быстро и на преодоление даже небольших расстояний ему требуется время, явственно различаемое нашими органами чувств.

Охотник стреляет в летящую утку. Он целится не в нее, а в пространство перед нею. Нас это тоже не удивляет. Дробь летит с ограниченной скоростью и если прицел был правилен, то за то время, пока дробь летит

до нужной части пространства, утка прилетит туда же и будет сражена.

Таких примеров можно набрать много. Во всевозможных областях нашей деятельности нам приходится считаться с тем, что различные процессы протекают не мгновенно, на них требуется какое-то время, которое необходимо учитывать.

И вот только в том, что относится к свету и к электричеству, мы считаем себя свободными от этой необходимости. Мы уверены в том, что стоит повернуть выключатель или нажать кнопку, как электрический ток мгновенно промчится по проводам и приведет в действие лампу, двигатель или какое-нибудь иное устройство, причем длина проводов не играет в данном случае никакой роли.

Так ли это?

При всем уважении и любви к электричеству приходится сознаться в том, что это не так. Электрический ток распространяется не «мгновенно» и его практически нельзя приравнивать в этом отношении к свету. Кроме того, надо внести ясность в само название «электрический ток».

Электрический ток по своей физической сущности является движущимися электрическими зарядами — в большинстве случаев электронами. Движущийся электрон есть электрический ток. Но электрон не начинает двигаться сам по себе, ни с того, ни с сего. Для этого на электрон должна воздействовать определенная причина. Причины могут быть различные, в том числе механические — удар какой-нибудь частицы. В тех случаях, которые нас больше интересуют, электрон чаще приходит в движение под воздействием электрического или магнитного поля. Но движение носителей тока — электронов происходит очень медленно.

Что делается «внутри» провода? В образовании электрического тока принимают участие свободные электроны, содержащиеся в проводниках в огромном количестве (число свободных электронов примерно равно числу атомов). Эти электроны не остаются неподвижными, если в проводнике нет тока. Они находятся в постоянном хаотическом тепловом движении. Но не следует думать, что электроны движутся в металле легко и свободно. Их движение затруднено. Электроны испытывают непрестанные столкновения как друг с другом, так и с ато-

мами и в результате этих столкновений изменяют направление своего движения, уменьшают или увеличивают его скорость, а зачастую и отскакивают в обратном направлении.

Фактически тепловая скорость движения электронов в проводах составляет в среднем всего лишь несколько десятков километров в секунду. Почти никакого электрического действия тепловое движение электронов не производит, хотя всякое движение электронов представляет собой электрический ток. Объясняется это хаотическим характером теплового движения: любому числу электронов, движущихся в каком-нибудь направлении с какой-то скоростью, всегда соответствует такое же количество электронов, движущихся в противоположном направлении с той же скоростью. Поэтому они не производят никакого электрического действия, так как создаваемые ими поля противоположны и взаимно гасятся.

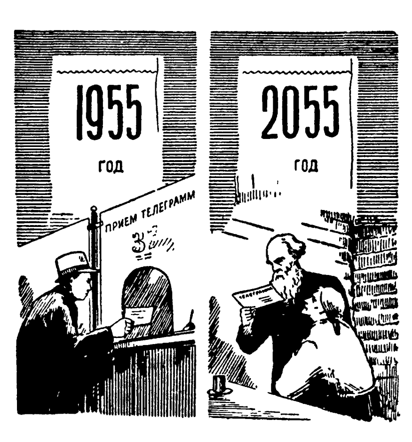
При воздействии на электроны постороннего электрического поля, кроме такого хаотического движения, возникает еще и упорядоченное движение электронов в одну сторону, определяемую знаком поля. Это не означает, что все свободные электроны при наличии поля начинают двигаться в одну сторону. Скорость, которую приобретают электроны под действием поля, сравнительно невелика, но она складывается со скоростью теплового движения. Это значит, что электроны, двигавшиеся в направлении действия поля, увеличат свою скорость, а движение электронов в обратном направлении замедлится. Те из них, скорость которых была мала, меньше скорости, сообщаемой полем, изменят направление движения и начнут перемещаться в сторону действия поля. В итоге через любое сечение проводника за секунду будет проходить больше электронов в направлении действия поля, чем в обратном направлении. Чем сильнее электрическое поле — чем больше действующее в цепи напряжение, тем более велика будет и эта разница — тем сильнее будет электрический ток, величина которого определяется числом электронов, протекающих за единицу времени через поперечное сечение проводника.

Какова же скорость движения электронов, вызванная действием электрического поля?

В проводах скорость движения электронов под действием поля в промежутках времени между двумя столк-

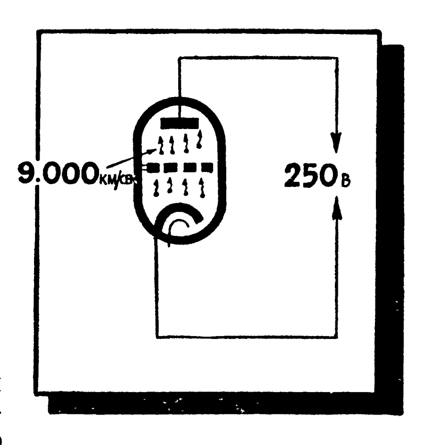
новениями может достигать нескольких километров в секунду. Но бесчисленные столкновения приводят к тому, что действительное перемещение электронов в направлении действия поля происходит с очень малой скоростью. Эта скорость в конечном счете определяется напряженностью поля и при напряженности поля 1 *в* на сантиметр длины провода составляет около 10 *см/сек*.

Но такая напряженность поля очень велика и встречается редко. Чтобы создать такое поле в проводе длиной 1 *км*, надо подвести к нему напряжение 100 000 *в*. Фактически имеющие место напряженности поля бывают значительно меньше, и средняя скорость движения электронов в направлении действия такого поля достигает немногих миллиметров или даже долей миллиметра в секунду. Например, в осветительной сети скорость движения электронов составляет 1—3 *мм/сек*. За час электроны передвигаются на расстояние всего около 10 *м*. Если бы скорость распространения электрического тока по проводам определялась скоростью движения электронов, то электрическая связь была бы немыслима. Телеграмма, посланная из Москвы, во Владивосток, пришла бы туда через 100 лет. Ее получили бы правнуки адресата. А лампочку, простую электрическую лампочку в люстре, нам приходилось бы включать за полчаса до того, когда нам потребуется ее свет, так как раньше электроны не добрались бы до нее. (В этих примерах мы считаем, что имеем дело с постоянным током, который создается движением электронов в одну сторону. При переменном токе электроны совершают лишь колебательные движения с такою же малой скоростью около среднего положения и вообще не перемещаются на большие расстояния.)



В вакууме скорость движения электронов больше, чем в проводах. Это объясняется тем, что здесь электро-

ны испытывают сравнительно мало столкновений с молекулами разреженных газов, оставшихся после откачки. Мы имеем здесь в виду такую степень вакуума, которая фактически бывает в электронных лампах. Поэтому в этом случае скорость движения электронов определяется только ускоряющим действием поля и фактически значительно превышает тепловую скорость. В электронных лампах при анодном напряжении 250 *в* электроны пролетают пространство между катодом и анодом со скоростью около 9 000 *км/сек*. Еще значительно быстрее мчатся электроны в телевизионных трубках, где они разгоняются напряжением во много тысяч вольт.



Направление теплового движения электронов в проводниках хаотично. В каждый данный момент известное количество электронов имеет такое направление движения, которое должно привести к их вылету за пределы проводника. Однако преодоление поверхностного слоя представляет для электронов серьезное затруднение, так как он отталкивает их внутрь проводника (см. стр. 104). Чтобы прорваться наружу, электроны должны приобрести большую скорость. Например, для того чтобы вылететь из вольфрама — металла, из которого делаются нити накала радиоламп, электроны должны приобрести скорость 1 270 *км/сек*.

Подобную скорость электроны могут приобрести только при сильном нагревании проводника. Когда нужная скорость достигнута, начинается вылет электронов из проводника во внешнее пространство — начинается электронная эмиссия. Проводник из вольфрама для получения нормальной электронной эмиссии должен быть нагрет примерно до 2 500° С.

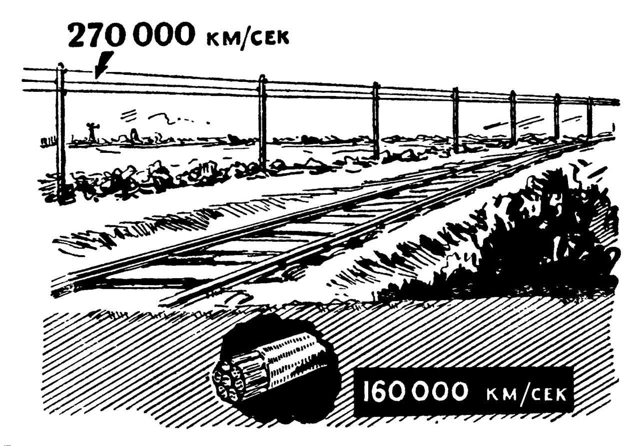
Таким образом, скорость движения электронов в осветительных сетях и в обычной электроаппаратуре, например в радиоаппаратуре, колеблется в пределах при-

мерно от долей миллиметра до нескольких тысяч километров в секунду. Причем большие скорости наблюдаются только в накаленных проводниках и электронных лампах, в других же случаях скорость движения — миллиметры в секунду.

А как же обстоит дело с «мгновенным» распространением электрического тока? Ведь это же не фикция! Лампочка под потолком загорается практически одновременно с поворотом включателя.

Именно поэтому несколько выше и было сказано, что в само понятие «электрический ток» должна быть внесена ясность. Электрический ток физически есть поток электронов, движущихся в большинстве случаев очень медленно. Но попробуем внимательно проследить сам механизм тока.

У нас есть длинный провод, один из концов которого присоединен к полюсу аккумулятора (или любого другого источника тока), а второй конец остается неприсоединенным. Электродвижущая сила аккумулятора произведет в этой незамкнутой цепи некоторое перераспределение электронов. Если, например, провод присоединен к положительному полюсу аккумулятора, то на его свободном конце образуется нехватка электронов, соответствующая положительному заряду, а на свободной клемме аккумулятора создастся избыток электронов (отрицательный заряд). Если теперь свободный конец провода присоединить ко второй клемме аккумулятора, то электроны устремятся с клеммы в провод, чтобы восполнить там нехватку электронов. Само по себе движение электронов будет, как мы знаем, медленным, но как только первые электроны придут в движение, то их поле заставит двигаться электроны, находящиеся впереди. Поле этих электронов в свою очередь побудит начать движение следующие электроны и т. д. В результате поле, заставляющее электроны двигаться, помчится по проводу с большой скоростью. Вот эта скорость — скорость распространения поля — действительно велика, настолько велика, что практически не будет ошибкой считать ее «мгновенной». Когда мы повертываем выключатель лампы, то поле с баснословной скоростью проносится по проводу и заставляет двинуться электроны в нити накала лампы, вследствие чего происходит ее нагревание.



Но было бы все же неправильно утверждать, что электрический ток (в таком его понимании) распространяется со скоростью света. Если замыкаемая цепь очень коротка и прямолинейна, то скорость распространения тока действительно не отличается существенно от скорости света (300 000 *км/сек*). Но в длинных проводах скорость тока меньше скорости света, причем разница зависит от рода провода (от рода линии). С этим приходится практически считаться. Есть, например, приборы для определения повреждений проводных линий. Они работают по принципу радиолокатора: в линию посылается импульс тока, который отражается от места повреждения и возвращается к месту посылки, где и улавливается. По времени между посылкой импульса и его возвращением и судят о расстоянии до места повреждения. В этом случае надо знать точную величину скорости распространения тока в данной линии, иначе определение расстояния не будет верным.

И вот измерения показали, что в воздушных линиях скорость распространения тока колеблется в пределах от 270 000 до 290 000 *км/сек*, в подземных кабелях — от 194 000 до 290 000 *км/сек*, а в силовых высокочастотных кабелях она составляет всего 160 000 *км/сек* — почти вдвое меньше скорости света.

Таким образом, различных «скоростей тока» очень много. Эта величина в зависимости от того, с какой позиции ее рассматривать, может быть равна и долям миллиметра и сотням тысяч километров в секунду, но она никогда не бывает равна скорости света (в пустоте).



Что такое электрический ток?

В наши дни физические знания распространены очень широко, и большинство ответит на такой вопрос двумя словами: «Поток электронов».

Однако теперь подобный ответ неточно отражает физическую сущность явлений.

Определение «поток электронов» относится к той эпохе, когда приходилось встречаться главным образом с электрическими явлениями в виде тока в проводниках. В этом случае электрический ток действительно представляет собой упорядоченное перемещение электронов, а характер этого движения может быть сравнен с потоком. Подвижными носителями электрических зарядов здесь являются свободные электроны, массами движущиеся в одном направлении, и это их движение может быть по праву названо потоком.

Но это определение далеко не всегда соответствует действительности.

Весьма распространенными носителями электрических зарядов являются ионы. Атомы в нормальном состоянии электрически нейтральны: положительный заряд ядра полностью уравновешивается отрицательными зарядами электронов в его электронных «оболочках». Но атомы могут терять электроны или же захватывать лишние, «сверхкомплектные» электроны. В обоих случаях атом становится ионом.

Атом с недостающим электроном имеет положительный заряд, а атом с излишним электроном — отрицательный. Движение ионов тоже представляет собой электрический ток. По внешним проявлениям нельзя определить, какие носители электрических зарядов в данном случае движутся — электроны или ионы.

Однако ионы более громоздки, чем электроны; ведь ион — это целая система элементарных частиц. Поэто-

му ионы далеко не во всех проводниках могут передвигаться свободно. Вот в жидких проводниках с легко подвижными частицами ионы могут перемещаться, и электрический ток в жидкостях образуется не только электронами, но также ионами. В электролите аккумуляторов и гальванических элементов течет ионный и электронный ток; положительные ионы движутся в одну сторону, а электроны — в обратную.

Но ионы движутся в электролите. «Войти» в твердые электроды, посредством которых ток выводится из элемента или аккумулятора, ионы не могут. Поэтому на границе между жидкостью и электродами происходит своего рода преобразование ионного тока в электронный и наоборот. Положительные ионы, притягиваясь к отрицательному электроду, на котором скопились избыточные электроны, заимствуют у него недостающие у них самих электроны и превращаются в нейтральные атомы. Понятно, почему это происходит. Собственная скорость электронов в твердом электроде и электрическое поле, действующее в электролите, недостаточны для того, чтобы электроны могли преодолеть сопротивление поверхностного слоя и вырваться наружу. Но когда вплотную к электроду подходит положительный ион, то поле получается настолько сильным, что электрон вырывается из электрода.

К положительному электроду, обедненному электронами, притягиваются как свободные электроны, так и отрицательные ионы, которые отдают свои избыточные электроны, тоже превращаясь в нейтральные атомы.

К этому надо добавить, что ионами, образующими ток в жидкостях, могут быть не только атомы с недостающими или избыточными электронами, но и соответствующим образом ионизированные молекулы, т. е. сочетания атомов.

Ионный ток образуется также в газах — в неоновых лампах, газотронах и пр. В электронных лампах основной ток электронный, но здесь могут параллельно существовать и ионные токи, потому что оставшиеся в колбе лампы атомы и молекулы газа могут ионизироваться в результате столкновения с электронами, летящими с большой скоростью. Например, работа электронно-лучевых трубок основана на использовании тонкого пучка электронов (электронного луча), но наряду с этим в

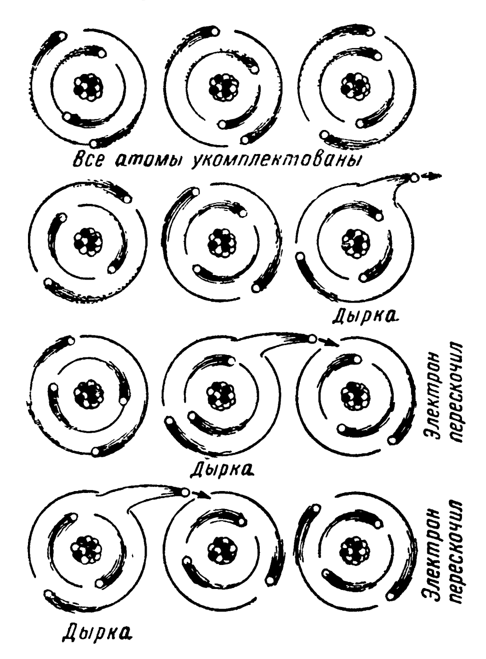
трубках образуются и ионы. Вследствие бомбардировки этими ионами (отрицательными ионами кислорода) на экранах телевизоров образуются завоевавшие себе печальную известность «ионные пятна». Теперь, чтобы сделать невозможным появление этих пятен, в электронно-лучевых трубках устраивают специальные ионные ловушки.

Большим своеобразием отличается физическая природа электрического тока в полупроводниках. Она очень сложна и изменяет свой характер в связи со многими причинами — материалом полупроводника, температурой, наличием примесей.

Чистый полупроводник при сильном охлаждении подобен изолятору. Все его электроны прочно удерживаются в своих атомах. Поэтому внешнее электрическое поле не может вызвать движение зарядов — нет зарядов, способных двигаться. В результате электрический ток не возникает. Это — изолятор, к нему приложено напряжение, но ток не возник. Однако электроны в атомах полупроводников удерживаются все же не так прочно, как в атомах изоляторов. При нагревании, при облучении светом или невидимыми лучами электроны получают дополнительную энергию, достаточную для того, чтобы вырваться из атома и получить возможность передвигаться. В результате в полупроводниках появляются свободные заряды, создающие проводимость. Из этого, между прочим, вытекает одна из особенностей полупроводников — при нагревании их проводимость увеличивается, тогда как у проводников она уменьшается — увеличившиеся размахи колебания атомов затрудняют движение электронов. Конечно, и у полупроводников усиление колебаний атомов по мере нагревания затрудняет движение электронов, но это перекрывается увеличением числа свободных электронов, тогда как у проводников число свободных электронов при нагревании практически не увеличивается.

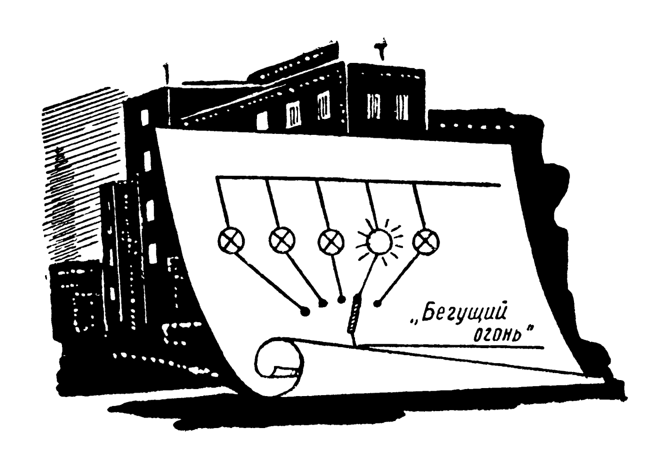
Образовавшиеся в полупроводнике вследствие нагревания или облучения свободные электроны образуют обычную электронную проводимость. Но есть большая группа полупроводников, для которых характерна проводимость несколько иного рода. В таких полупроводниках в результате нагревания или облучения тоже происходит вырывание электрона из атома. Атом, потеряв-

ший электрон, становится положительным ионом. Такой положительный ион под воздействием электрического поля притягивает к себе недостающий электрон из соседнего «нормального» атома, превращая его тем самым в положительный ион. Этот ион в свою очередь заимствует недостающий электрон у следующего атома и т. д. Все атомы при этом остаются на своих местах,



но положительный ион как бы движется в сторону отрицательного полюса приложенного напряжения. Получается что-то подобное тому виду иллюминации, который называется «бегущим огнем». Чтобы создать подобие движущегося огня, не надо обязательно передвигать лампу. Можно установить цепочку ламп и зажигать их по очереди.

Физики называют неподвижный положительный ион, т. е. атом с недостающим электроном, «дыркой», а ток, который создается в результате кажущегося движения «дырки», — «дырочным» током. Он отличается от ионного тока тем, что при ионном токе ионы действительно движутся.



В зависимости от рода полупроводника говорят, что он обладает «электронной» или «дырочной» проводимостью». У некоторых полупроводников соответствующей обработкой можно получить любой из этих двух видов проводимости. К таким полупроводникам принадлежит, например, германий. Его обработка состоит в основном в присадке в нужном количестве разных примесей. Примесные атомы, имеющие на один электрон больше, чем атомы полупроводника, создают электронную проводимость. Если у примесных атомов на один электрон меньше, чем у полупроводника, то это способствует образованию дырочной проводимости.

Обычная электронная проводимость металлов, ионная и смешанная электронно-ионная проводимость жидкостей и газов, электронная и дырочная проводимость полупроводников представляют собой четыре наиболее обычных вида проводимости, широко используемых в технике. Как видим, не всегда электрический ток образуется движением электронов и не всегда это движение подходит под понятие «потока». Дырочную проводимость скорее можно уподобить какой-то эстафете, но никак не потоку.

Но и рассмотренные четыре вида не исчерпывают всего многообразия электрических токов. Физики, например, получают мощные потоки протонов и ядер гелия, имеющих положительный заряд, движение которых поэтому представляет собой электрический ток. Некоторые физические опыты сопровождаются появлени-

ем позитронов — положительных электронов, движение которых тоже является электрическим током. Вырисовываются возможности использовать образование тока в плазме — смеси электронов с атомными ядрами, полностью или почти полностью лишенных своих электронных оболочек. Электрический ток в плазме будущих магнитогидродинамических генераторов будет образовываться движением как электронов, так и положительно заряженных атомных ядер.

Таким образом, в наши дни на вопрос «что такое электрический ток?» следовало бы отвечать: это упорядоченное движение электрических зарядов.



Можно ли ответить на этот вопрос?

В отдаленные времена, когда физики изучали сравнительно очень узкий круг известных им электрических явлений, были введены понятия положительного и отрицательного электричества. Знак плюс присвоили «стеклянному» электричеству — тому электрическому заряду, который возникает на стекле в результате натирания его шелком. Отрицательным электричеством стали считать «сургучное» — заряд, возникающий на сургуче, натертом шерстью. В дальнейшем условились считать, что электрический ток течет от плюса к минусу.

Такая терминология оказалась удобной. Она сохранилась до наших дней. На ее базе сформулированы все основные законы, правила и зависимости учения об электричестве.

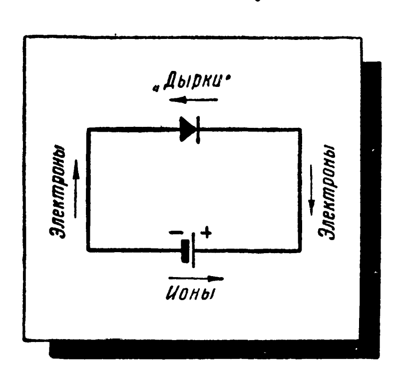
Однако несоответствие подобной терминологии физической сущности электрических явлений стало очевидным уже в конце прошлого столетия, когда были открыты электроны. Это открытие показало, что электрический ток имеет «зернистую» структуру и представляет

собой поток мельчайших отрицательных зарядов — электронов. Электроны движутся от минуса к плюсу, т. е. в направлении, обратном тому, какое было установлено на заре электротехники.

Это породило двойственность и путаницу. Во многих случаях, когда речь шла о направлении тока, приходилось специально оговаривать, как понимать направление: «по току» или «по электронам». Особенно болезненно эта терминологическая двойственность чувствуется в радиоэлектронике, где для уяснения работы схем и приборов часто бывает необходимо учитывать именно направление движения электронов. Например, в какую сторону «проводит» электронная лампа? Если считать «по току», то лампа проводит от анода к катоду, а если «по электронам» — то от катода к аноду.

Иногда высказывается мысль о необходимости устранить двойственность терминологии и установить единообразие в представлении о направлении тока.

Можно ли осуществить подобное единообразие?



Это сделать не так легко, как кажется. Конечно, можно изъять из всей выходящей литературы упоминание о старом толковании направления течения тока от плюса к минусу и ввести... А что же ввести? Направление движения электронов? Это было бы просто и правильно сделать в том случае, если бы электрический ток образовывали одни электроны или вообще одни отрицательные заряды. Но известно, что носители тока существуют двух знаков и под воздействием одного и того же поля они движутся навстречу друг другу. Во внешней цепи гальванического элемента электроны движутся в одном направлении, а внутри элемента положительные ионы движутся в обратном направлении. Внутри полупроводника с дырочной проводимостью «дырки» текут в одном направлении, в проводах электроны текут навстречу им, а в источнике тока положительные ионы снова движутся навстречу в обратном направле-

нии. В результате в двух участках замкнутой цепи носители тока перемещаются в одну сторону, а в двух других участках — в обратную.

Какое бы явление ни было положено в основу определения направления тока, например порождаемое током магнитное поле, все равно, как только дело дойдет до носителей тока, на сцену выступит двойственность. И, в частности, станет ясно, что приводимые в учебниках «правила штопора» или «правила левой руки» верны только в отношении определенных носителей тока.



Казалось бы, вопрос ясен. Эти величины равны. Но не всегда это верно. Например, будет ли одинаково сопротивление провода сечением 1 *мм*² и сопротивление десяти проводов сечением по 0,1 *мм*², соединенных параллельно? В радиотехнике — не будет. Благодаря тому, что токи высокой частоты текут не по всей толще, а только по поверхности проводника, десять проводников окажутся выгоднее, так как их общая поверхность примерно в 3 раза больше, чем поверхность одного провода с таким же сечением.

На использовании этой особенности прохождения токов высокой частоты основано применение специального многожильного провода — литцендрата. Этот высокочастотный провод состоит из большого числа (до 20) отдельных тонких жилок диаметром 0,07—0,2 *мм*, перевитых между собой и заключенных в общую шелковую обмотку. Все жилки должны быть изолированы друг от друга по всей длине и соединены только на концах. Если они не будут изолированы, все преимущества такого провода пропадут, так как токи будут идти не по десяти отдельным путям, а по общему пути как в одножильном проводе.

Чтобы наилучшим образом использовать материал проводов — медь, нужно применять как можно более тонкие жилки; тогда в каждой из них в прохождении тока будет принимать участие бо́льшая часть всего металла.



Под словом «сопротивление» в электротехнике и радиотехнике понимается сопротивление, оказываемое движению электрических зарядов той средой, в которой это движение происходит.

Существуют вещества, в которых движение зарядов почти невозможно. Такие вещества называются изоляторами. В ряде веществ движение зарядов весьма затруднено. Такие вещества получили название полупроводников. Значительное количество веществ относится к категории проводников. Они характерны тем, что движущиеся заряды встречают в них минимальное сопротивление. Однако даже самые лучшие проводники, такие, как серебро или медь, все же оказывают движению зарядов определенное сопротивление, на преодоление которого приходится расходовать энергию.

Возможны ли случаи, когда движение зарядов происходит без сопротивления?

Мы знаем два таких случая.

Первый из них — движение зарядов в таком пространстве, которое мы условно называем пустотой (см. стр. 18). Если в подобное пространство, например в баллон, из которого выкачан газ и в котором нет электрического и магнитного полей, ввести заряд (например, способом термоэмиссии) и сообщить ему некоторую скорость, то он будет двигаться с этой скоростью, не затрачивая запасенной энергии.

Второй случай отсутствия сопротивления наблюдается у некоторых металлов в сверхпроводящем состоянии. Установлено, что ряд металлов, их сплавов и некоторых химических соединений при сильном охлаждении утрачивает сопротивление электрическому току, становится «сверхпроводником». К ним относятся, например, алюминий, свинец, цинк, уран, ртуть. Температуры, при которых наблюдается переход в сверхпроводящее состояние, колеблются в пределах примерно от 1 до 10 граду-

сов абсолютной шкалы температур (нуль абсолютной шкалы соответствует температуре минус 273,16° С).

Физические явления, связанные со сверхпроводимостью, еще окончательно не выяснены. Они зависят от особенностей кристаллической структуры проводников и уменьшения тепловых колебаний при понижении температуры, но бесспорными тщательными опытами подтверждено, что сопротивление материалов в сверхпроводящем состоянии равно нулю или во вяком случае чрезвычайно близко к нему. Ток, возбужденный в кольце из сверхпроводника, не уменьшается и циркулирует все время, пока поддерживается нужная температура.

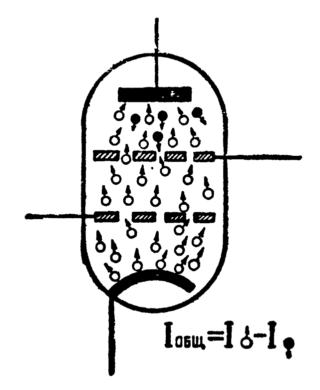
Возможно ли сопротивление меньше нуля, т. е. сопротивление отрицательное? Попробуем рассмотреть этот вопрос с чисто физической точки зрения, не вдаваясь в его формально-теоретические математические аспекты.

В радиотехнике приходится встречаться с понятием отрицательного сопротивления.

Отрицательным сопротивлением объясняют известную особенность работы четырехэлектродной лампы (тетрода) в динатронном режиме. Эта особенность заключается в том, что при напряжениях на аноде, близких к напряжению на экранирующей сетке, увеличение анодного напряжения вызывает не рост анодного тока лампы, а, наоборот, его уменьшение. По принятому толкованию действующее в цепи сопротивление является отрицательным.

В действительности это объясняется динатронным эффектом. Электроны, образующие анодный ток, ударяясь об анод, выбивают из него другие электроны, которые называются вторичными.

Вторичные электроны, получив в результате удара некоторый запас энергии, отлетают от анода по направлению к экранирующей сетке и могут настолько приблизиться к ней, что притягивающее действие экранирующей сетки превысит притягивающее действие анода. Поэтому такие электроны летят к экранирующей сетке, образуют в лампе ток, направленный навстречу основному анодному току, и уменьшают его. Действующий анодный ток равен разности двух указанных токов.



При увеличении анодного напряжения электроны с большей силой ударяются об анод и выбивают из него больше вторичных электронов, вылетающих с увеличенной скоростью. Поток вторичных электронов непропорционально возрастает — в итоге действующий анодный ток становится меньше.

При дальнейшем увеличении анодного напряжения явление прекращается, потому что выбитые из анода электроны снова притягиваются к нему и экранирующая сетка уже не может «перехватить» их.

Как видим, в данном случае нельзя усмотреть присутствия какого-либо сопротивления, обладающего необычным свойством. Суть явления заключается в возникновении второго потока электронов, направление которого противоположно направлению основного потока.

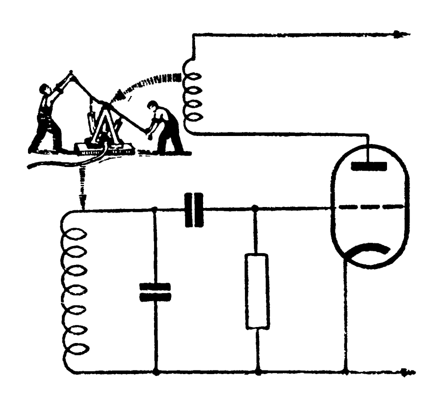
Не менее часто понятие отрицательного сопротивления используется для объяснения работы регенеративных приемников, гетеродинов и т. п.

Это объяснение сводится к тому, что обратная связь вносит в колебательный контур отрицательное сопротивление и этим уменьшает его положительное сопротивление — сопротивление потерь. Когда отрицательное сопротивление по величине становится равным положительному, действующее сопротивление контура делается равным нулю. При дальнейшем возрастании вносимого отрицательного сопротивления общее сопротивление контура становится отрицательным. Контур с отрицательным сопротивлением превращается в генератор и становится источником колебаний.

В этом случае тоже нельзя говорить об отрицательном сопротивлении контура, как о реально существующем. Сопротивление контура движению электрических зарядов остается неизменным при любом значении обратной связи.

Качающийся маятник, предоставленный самому себе, скоро остановится. Но мы можем сообщить маятнику толчки, совпадающие по частоте и направлению с его

колебаниями. Интенсивность толчков можно подобрать так, что они будут как раз компенсировать действие всех «сопротивлений» (сопротивление воздуха, трение в точке подвеса и т. д.), и колебания маятника из затухающих превратятся в незатухающие. Увеличив еще более силу толчков, мы превратим колебания маятника в



нарастающие (их амплитуда будет увеличиваться) и сможем заставить его совершать какую-нибудь работу. Та дополнительная энергия подталкивания, которая расходовалась бы на увеличение амплитуды колебаний маятника, будет теперь расходоваться на совершение работы, а амплитуда колебаний останется постоянной.

По аналогии с колебательным контуром и в этом случае можно было бы считать, что все сопротивления, тормозившие ранее движение маятника, стали отрицательными и не только не тормозят его, а, наоборот, подгоняют. Однако мы знаем, что это не так: маятник, совершая работу, продолжает качаться только потому, что мы периодически пополняем своими толчками запас его энергии.

Подобным же образом пополняются потери энергии и в колебательном контуре. Поле катушки обратной связи, изменяясь в такт с электрическими колебаниями в контуре, поддерживает их, пополняя энергию, которая затрачивается на преодоление сопротивлений контура и излучение.

Понятие отрицательного сопротивления нередко привлекается для пояснения особенностей работы «генери-

рующих» кристаллических детекторов, к которым относится ряд детекторов от цинкитного детектора О. Лосева до современного германиевого диода, включая новейшие «туннельные» диоды. Генерирование таких детекторов объясняют наличием в их характеристике участка с отрицательным сопротивлением. При работе на таком участке характеристики увеличение текущего через детектор тока сопровождается не увеличением падения напряжения на детекторе, а его уменьшением.

Физические процессы, происходящие в детекторах подобного типа, полностью не прослежены, но ясно, что они вызывают в кристалле детектора (диода) возникновение дополнительного тока, по направлению совпадающего с основным. Например, в «туннельном» диоде при некоторых напряжениях ток растет значительно быстрее, чем в обычном диоде, из-за «туннельного» эффекта — прохода электронов, не имеющих энергии для преодоления потенциального барьера, сквозь некоторые «туннели» в этом барьере. При дальнейшем увеличении напряжения «туннельный» эффект уменьшается и затем исчезает совсем. На этом участке увеличение напряжения вследствие постепенного исчезновения «туннельного» эффекта сопровождается уменьшением тока, а не его увеличением, как следовало бы. При более значительном увеличении напряжения работа «туннельного» диода не отличается от работы обычного диода. Поэтому на некотором участке его характеристики наблюдается уменьшение тока при увеличении напряжения.

Таким образом, сопротивление электрическому току может либо иметь какое-то определенное положительное значение, либо равняться нулю. Отрицательного сопротивления как физического свойства вещества не существует, хотя отдельные цепи в результате происходящих в них процессов могут вести себя так, как если бы их сопротивление было отрицательным. Однако при этом в таких цепях обязательно находятся источники электрического тока, энергия которых и расходуется на поддержание всех происходящих в цепях процессов.



ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В РАДИОАППАРАТУРЕ

Работа радиовещательной аппаратуры характерна большим числом преобразований одного вида энергии в другой.

Когда, например, сельский радиослушатель включает свой радиоприемник «Родина», в его радиоустановке происходит ряд превращений энергии. Химическая энергия гальванических элементов превращается в электрическую, электрическая в нитях накала ламп—в тепловую, причем тепловая энергия частично снова превращается в электрическую, разгоняя электроны до скорости, нужной для вылета их из нити, т. е. способствуя образованию анодного тока. В неоновой индикаторной лампочке электрическая энергия преобразуется отчасти в тепловую, нагревая газ и баллон лампочки, отчасти в световую, порождая известное всем красное свечение. Свечение нитей накала ламп является результатом трехкратного преобразования энергии: химической в электрическую, затем электрической в тепловую и, наконец, тепловой в световую. Последним звеном длинного ряда преобразований энергии является преобразование громкоговорителем электрической энергии в механическую — звуковую.

Работа любой радиоустановки богата примерами подобных преобразований.

В помещенной ниже таблице приведены 11 наиболее распространенных в радиоаппаратуре видов преобразования энергии.

Во многих случаях между приведенными в таблице этапами есть еще несколько промежуточных и побочных. Например, в работе оптического индикатора настройки, приведенного в качестве примера преобразования электрической энергии в световую, можно насчитать ряд других преобразований: электрической в тепловую (нагрев катода), тепловой в световую (свечение катода) и электрическую (работа вылета), электрической в тепловую (нагрев анода) и световую (свечение экрана) и т. д.

Внешний вид	Виды преобразования энергии	Элементы аппаратуры
	Механическая в электрическую	Электродинамический микрофон, граммофонный звукосниматель
	Электрическая в механическую	Громкоговоритель, двигатель электропроигрывателя, подвижная система измерительных приборов
	Световая в электрическую	Фотоэлемент, иконоскоп
	Электрическая в световую	Электронно-лучевые трубки телевизоров и осциллографов, оптический индикатор настройки
	Химическая в электрическую	Гальванический элемент, аккумулятор (разрядка)
	Электрическая в химическую	Аккумулятор (зарядка)

Внешний вид	Виды преобразования энергии	Элементы аппаратуры
	Тепловая в электрическую	Термоэлемент, катод (разгон электронов до скорости, нужной для вылета)
	Электрическая в тепловую	Нити накала радиоламп
	Электрическая в магнитную	Записывающая головка магнитофона
	Магнитная в электрическую	Головка воспроизведения записи магнитофона
	Световая в электрическую	Солнечные батареи

Следует учитывать, что переход одного вида энергии в другой всегда сопровождается уменьшением количества первичного вида энергии вследствие различных потерь, в большинстве случаев на излучение тепла. Тепловая энергия катода затрачивается на разгон электронов до скорости, нужной для их вылета, и уменьшается на такую величину, какую унесли с собой вылетевшие электроны.

В этом отношении интересен десятый из приведенных в таблице примеров преобразования энергии. При воспроизведении магнитофоном записи на магнитной ленте магнитная энергия ленты не уменьшается, в противном случае каждое последующее воспроизведение было бы слабее предыдущего. Движущееся магнитное поле ленты за счет энергии мотора наводит в головке воспроизведения переменное магнитное поле, энергия которого и расходуется на создание в витках обмотки электрического тока. Преобразование магнитной энергии в электрическую происходит именно в последнем звене: магнитное поле головки — обмотка катушки, а не в звене: магнитное поле ленты — обмотка головки, так как магнитное поле ленты не становится слабее.

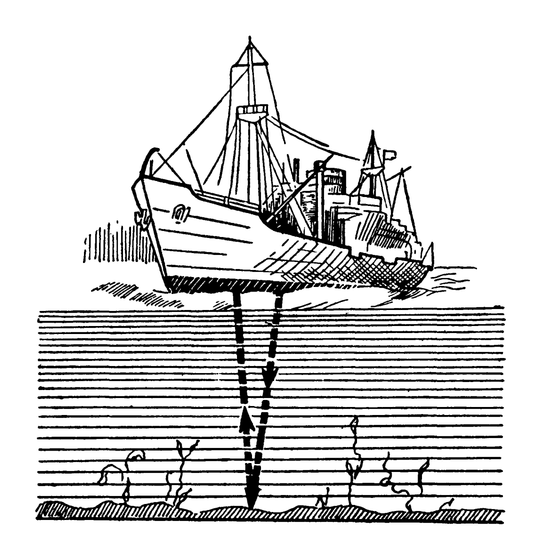


Радиотехнику с большим основанием можно назвать техникой колебательных процессов.

Радиосвязь осуществляется при помощи электромагнитных волн, представляющих собой периодически меняющееся электромагнитное поле; работа радиоаппаратуры основана на использовании переменных токов, являющихся электрическими колебаниями — колебаниями электрических зарядов в проводниках; мембраны теле-

фонов и микрофонов, диффузоры громкоговорителей, иглы звукоснимателей совершают механические колебания; колебания интенсивности магнитного поля в зазорах головок магнитофонов лежат в основе работы этих аппаратов, фотоэлементы представляют собой приборы, использующие световые колебания.

Этот перечень нетрудно продолжить. Например, можно было бы вспомнить инфракрасные и ультрафиолетовые колебания, используемые некоторыми фотоэлементами, ультразвуковые колебания пьезопластин в эхолотах и т. п.



Мир колебаний велик, его охват радиотехникой с каждым годом расширяется. В приводимой ниже таблице показаны обследованные пока спектры колебаний двух основных видов — механических и электрических. Под последней рубрикой объединены колебания электрических зарядов и колебания электромагнитных полей, т. е. электромагнитные волны. Указанные в таблице границы различных зон приблизительны, условны. Как нельзя, например, провести резкую грань между длинными и средними волнами, так и нельзя точно определить ее между ультрафиолетовыми и рентгеновыми лучами, между слышимыми звуками и ультразвуками.

Механические колебания	Частота, *гц*	Электрические колебания
Инфразвуки	10	Технические переменные токи
Слышимые звуки	10^2	
		Токи звуковой частоты
	10^3	
	10^4	
Ультразвуки	10^5	Длинные радиоволны
	10^6	Средние радиоволны
	10^7	Короткие радиоволны
	10^8	Ультракороткие (метровые) радиоволны
	10^9	Дециметровые и сантиметровые радиоволны
	10^{10}	
	10^{11}	Миллиметровые радиоволны
Тепловые колебания	10^{12}	
	10^{13}	
	10^{14}	Инфракрасные лучи
Колебания в атомах и молекулах	10^{15}	Видимый свет
	10^{16}	Ультрафиолетовые лучи
	10^{17}	
	10^{18}	Рентгеновы лучи
	10^{19}	
	10^{20}	
	10^{21}	Гамма-лучи
	10^{22}	Космические лучи

Начальная частота таблицы 10 *гц*. Механические колебания такой и более низких частот принято называть инфразвуковыми. Их мы не слышим. Но при большой мощности инфразвуковые колебания производят на организм болезненно неприятное действие. Примером может служить так называемый «голос моря» — мощные инфразвуковые колебания, возникающие на морском берегу при определенном сочетании частоты волн и порывов ветра.

Электрические колебания инфразвуковых частот — переменные токи частоты порядка 10 *гц* — находят широкое применение в автоматике для испытаний разнообразных автоматических систем, а также в других областях техники.

Важным рубежом шкалы колебаний служит частота 15—16 *гц*. Механические колебания такой частоты становятся слышимыми. С этой частоты начинается мир звуков. Переменные токи частотой 15—16 *гц* применяются в многочисленной аппаратуре как электроакустиче-

ского, так и иного назначения. Переменные токи такой частоты используются и в технике — в силовых сетях.

Далее следует отметить частоты 50—60 *гц*. Они обычно составляют нижнюю границу полосы частот, воспроизводимой хорошими громкоговорителями. Кроме того, они являются наиболее распространенными частотами осветительных сетей переменного тока.

Верхний предел полосы звуковых частот находится около $16 \cdot 10^3$ *гц*. Более высоких частот человеческое ухо обычно не воспринимает. Далее начинается область ультразвуковых частот, обладающих многими замечательными свойствами. Область применения механических колебаний ультразвуковой частоты быстро расширяется. Ультразвуковые эхолоты, гидролокаторы, дефектоскопы стали обычными техническими приборами. В самых разнообразных установках используется дробящее действие ультразвука. Применения ультразвука весьма разнообразны: от ультразвуковых микроскопов до стирки белья ультразвуком. Механические колебания ультразвуковой частоты создаются, как правило, электрическими средствами, поэтому электрические колебания этой частоты применяются чрезвычайно широко.

Трудно назвать какую-либо определенную верхнюю границу ультразвуковых частот. Наиболее распространено использование частот примерно до 10^5 *гц*, но уже получены и постепенно находят практическое применение и более высокие частоты, вплоть до нескольких мегагерц.

Электрические колебания представляют собой колебательное движение электрических зарядов в проводниках. При частотах, начиная с самых низких инфразвуковых, эти колебания сопровождаются возникновением в окружающем пространстве переменных электрических и магнитных полей.

На частотах, начиная примерно с 10^5 *гц*, удобно использовать для передачи сигналов образовавшееся в пространстве возле проводника электромагнитное поле, которое распространяется со скоростью света, унося с собой определенную энергию. Такое «оторвавшееся» от проводника поле мы называем радиоволнами. Радиоволны имеют такую же частоту, как и вызвавшие их электрические колебания. В настоящее время изучены и так или иначе используются радиоволны до частот порядка 10^{11} *гц* (миллиметровые радиоволны).

Важнейшим рубежом в таблице колебаний являются частоты 10^{13}—10^{14} *гц*. Механические колебания до этого рубежа совершаются большими массами вещества, действующими как одно целое. Механические колебания более высоких частот относятся уже к разряду тепловых колебаний, которые совершают отдельные молекулы и атомы. Эти колебания сопровождаются излучением наиболее длинноволновых инфракрасных (тепловых) лучей,

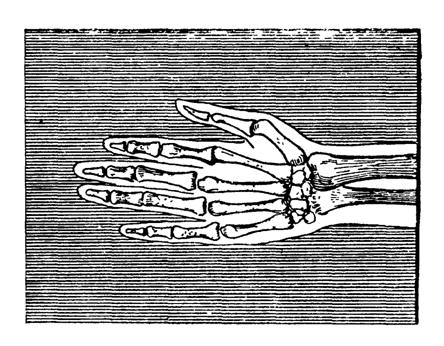


т. е. колеблющиеся молекулы или атомы являются, таким образом, источником электромагнитных волн.

Более короткие инфракрасные лучи возбуждаются уже в результате внутриатомных процессов, а именно при переходе электронов с более удаленных от ядра оболочек на оболочки, более близкие к ядру. Получение атомом какого-то количества энергии, например в результате столкновения с другой частицей, приводит к перескакиванию электронов с ближних к ядру оболочек на более отдаленные (чем дальше оболочка от ядра, тем большей энергией обладают находящиеся на ней электроны). Однако электроны не удерживаются там долго и возвращаются на «свою» оболочку, отдавая излишек энергии в виде излучения. Электроны наружных оболочек отдают эту излишнюю энергию в виде инфракрасного и светового излучения, электроны оболочек, нахо-

дящихся ближе к ядру, — в виде излучения ультрафиолетовых и рентгеновых лучей.

Наиболее высокочастотными механическими колебаниями являются колебания отдельных атомов в молекулах и электронов в атомах. Эти колебания сопровождаются излучением ультрафиолетовых и рентгеновых лучей. Еще более высокочастотными электромагнитными волнами являются гамма-лучи. Они возбуждаются не



в результате перехода электронов с одной оболочки на другую, а в результате процессов, происходящих в атомном ядре. Некоторые ядерные процессы сопровождаются выбрасыванием из ядра альфа- и бета-частиц (ядер гелия и электронов) и излучением гамма-лучей.

Замыкают таблицу электромагнитных колебаний космические лучи. Это может вызвать недоумение. Ведь космические лучи представляют собой поток материальных частиц, несущихся в космическом пространстве с огромной скоростью. Почему же они попали в рубрику электромагнитных колебаний?

Движущиеся элементарные частицы ведут себя одновременно и как частицы и как волны. Мы обычно рассматриваем электроны как материальные частицы, имеющие определенную массу. Но если пропустить пучок электронов сквозь очень малое отверстие, то выявляются их волновые свойства. Частота, соответствующая этим волнам, зависит от скорости движения частицы (см. стр. 14). Например, частота электронов, движущихся с такими скоростями, с какими нам практически прихо-

дится иметь дело, бывает порядка $6 \cdot 10^{16}$—$6 \cdot 10^{19}$ *гц* (длина волны 0,005—0,000005 *мк*), т. е. одинакова с частотой рентгеновых лучей. Частицы, составляющие космические лучи, движутся с гораздо бо́льшими скоростями, которым соответствуют частоты порядка 10^{22}—10^{26} *гц*. Это самые высокочастотные электромагнитные колебания, которые нам известны.



На вопрос «что такое вакуум?» обычно отвечают: «пространство с разреженным воздухом» или «пространство внутри сосуда, из которого выкачан воздух».

Можно ли удовлетвориться подобными ответами? Всякую ли степень разрежения можно назвать вакуумом и находится ли степень вакуума в какой-либо связи с атмосферным давлением?

Действительно, предположим, что в баллоне воздух разрежен в 10 000 раз по сравнению с его плотностью при нормальном атмосферном давлении, т. е. давление внутри баллона равно 0,076 *мм рт. ст.*

Будем ли в баллоне вакуум? И можем ли мы продолжать считать, что в баллоне вакуум, если этот баллон поднят на высоту 100 *км* над поверхностью земли, где давление воздуха составляет всего 0,007 *мм рт. ст.*? Ведь в этом случае плотность воздуха внутри баллона станет в 10 раз больше, чем снаружи. Если баллон непрочен, то его разорвет, как бомбу. Где теперь будет вакуум — внутри баллона или снаружи?

Современная физика связывает понятие вакуума не с величиной давления вне или внутри сосуда, а с длиной свободного пробега молекул газа внутри него. Молекулы газов находятся в беспрерывном хаотическом тепловом

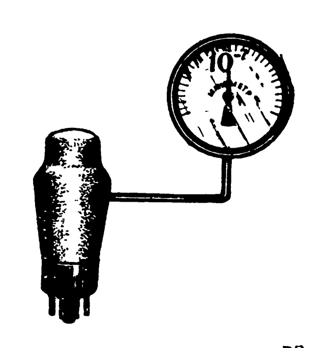
движении, достигающем больших скоростей: при комнатной температуре скорость теплового движения молекул воздуха равна примерно 450 *м/сек*, т. е. приближается к скорости пули. Двигаясь во всех направлениях, молекулы постоянно сталкиваются друг с другом. Чем плотнее воздух, тем больше молекул заключается в единице объема и тем чаще молекулы сталкиваются.

Если воздух разредить, то молекулы будут сталкиваться менее часто. В среднем им придется пролетать больший путь между двумя столкновениями, который называется длиной свободного пробега.

Вакуумом с физической точки зрения считается такое разрежение, при котором длина свободного пробега в среднем больше размеров сосуда. В этом случае столкновения молекул будут редкими, бо́льшая часть молекул в своем движении от одной стенки сосуда до другой не встретится с другими молекулами.

При разрежении в миллион раз (при давлении порядка 0,001 *мм*) средняя длина свободного пробега молекулы воздуха равна 10 *см*. Так как размеры баллона обычных приемно-усилительных ламп меньше 10 *см*, то с точки зрения физики пространство внутри этих ламп уже при подобном разрежении можно считать вакуумом.

Но для хорошей работы лампы такая степень вакуума недостаточна. Электроны, в огромном количестве летящие от катода лампы к ее аноду, будут все же встречать на своем пути довольно много молекул воздуха, столкновения электронов с ними будут частыми. В результате этих столкновений молекулы воздуха ионизируются, анодный ток резко возрастает, положительные ионы оседают на отрицательно заряженной сетке, изменяют ее заряд, а следовательно, и характер работы лампы. В приемниках и усилителях это, в частности, приводит к сильным искажениям. Поэтому в радиолампах добиваются значительно большего разрежения, доходящего обычно до 10^{-7} *мм* (0,0000001 *мм*), т. е. давление понижается примерно в 10 млрд. раз по сравнению с нормальным атмосферным давлением. При таком разрежении



длина свободного пробега молекул измеряется километрами и на пути от катода к аноду примерно лишь один электрон из миллиона может встретиться с молекулой воздуха. Столь редкие столкновения не могут вредно отразиться на работе лампы.



При таком огромном разрежении, какое достигается в радиолампе, в ней остается примерно одна десятимиллиардная часть того количества воздуха, которое было до откачки

Такое уменьшение — колоссально!

Если бы расстояние от Земли до Солнца уменьшилось в 10 млрд. раз, то Землю и Солнце разделяли бы всего 15 *м* — ширина среднего размера улицы. Земля, уменьшенная в такое число раз, превратилась бы в крупинку диаметром около 1 *мм*

И все-таки при подобном разрежении в баллоне электронной лампы обычных размеров, например 6К3, остается еще $40 \cdot 10^{12}$ (40 триллионов) молекул.

Это число огромно. Самые мелкие маковые зернышки имеют в диаметре около 0,5 мм. Разместив их правильными рядами, мы сможем уложить в 1 $мм^3$ восемь зернышек. Какой же объем займут 40 триллионов таких зернышек?

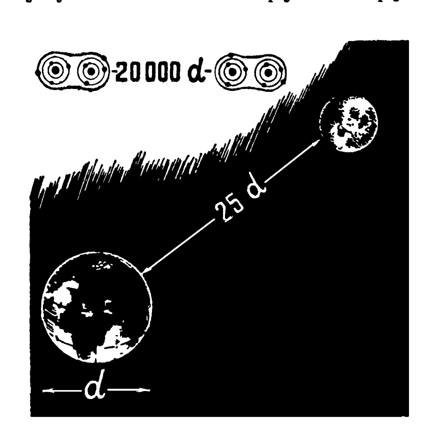
Несложный подсчет покажет, что для хранения подобного количества маковых зернышек потребуется помещение емкостью 5 000 $м^3$, т. е. куб со стороной около 17 *м*.

Но молекулы настолько малы, что для размещения их в количестве даже десятков триллионов нужен совсем микроскопический объем. Диаметр молекулы газа в среднем равен $1 \cdot 10^{-6}$ *мм* — одной миллионной миллиметра. Если те 40 триллионов молекул, которые остались в баллоне лампы, уложить плотно одна к другой, то они займут объем всего лишь $4 \cdot 10^{-5}$ *мм*. Этот объем

в 250 миллионов раз меньше объема баллона лампы. При равномерном размещении внутри баллона лампы всех оставшихся в ней после откачки молекул в каждом кубическом миллиметре окажется около 80 000 молекул.

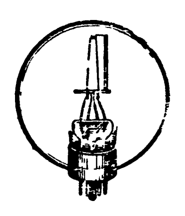
Это число тоже очень велико, но чтобы составить правильное представление о том, на каком расстоянии молекулы будут находиться друг от друга, надо перевести все величины в привычные нам масштабы.

При равномерном распределении 80 000 молекул в 1 *мм*³ они будут находиться друг от друга на расстоянии примерно 0,02 *мм*. Это расстояние в 20 000 раз больше диаметра молекулы. Перейдем к астрономическим масштабам. Земля удалена от Луны на расстояние, примерно в 25 раз превышающее диаметр Земли. Округляя, можно считать, что Земля находится от Луны в 1 000 раз ближе, чем молекула от молекулы в баллоне лампы. Чтобы еще лучше представить это себе, вернемся к маковым зернышкам. Два мельчайших маковых зернышка, разнесенных на расстояние, в 20 000 раз превышающее их диаметр, будут отстоять друг от друга на 10 *м*. Переходя на бытовые масшабы можно сказать, что два маковых зернышка в комнате площадью 50 *м*² — вот «густота» молекул в электронной лампе.



Естественно, что электроны, летящие от катода к аноду, почти не встречают на своем пути молекул воздуха; такие встречи возможны лишь в виде редких исключений.

ПОЧЕМУ ПЕРЕГОРАЕТ НИТЬ НАКАЛА



Почему у ламп перегорают нити накала или, выражаясь менее точно, но зато более кратко, почему перегорают лампы? Вы купили лампу, электронную или осветительную; она исправно работает некоторое время, но в конце концов перегорает, хотя условия ее работы не изменялись — к ней всегда подводится одно и то же, нормальное для нее напряжение накала. В чем заключается «физика» этого перегорания, почему один и тот же ток, нормальный вначале, впоследствии оказывается для нити губительным?

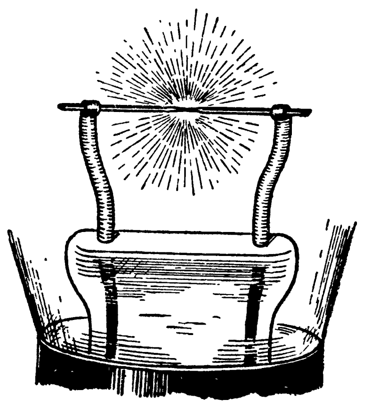
Рассматривая перегоревшую осветительную лампу, мы замечаем, что ее баллон изнутри потемнел. Появление темного налета объясняется оседанием на стенках баллона паров вольфрама, из которого сделана нить. Нити накала осветительных ламп работают при температуре порядка 2 500° С. При такой температуре начинается заметное испарение вольфрама. Процесс перегорания нити обычно таков: толщина нити по всей ее длине не абсолютно одинакова, местами нить несколько толще, местами — тоньше. Там, где нить тоньше, ее сопротивление, естественно, больше, вследствие чего это место нагревается сильнее (нагрев пропорционален величине сопротивления). Следовательно, и ее испарение в этом месте происходит интенсивнее, отчего нить еще больше утончается.

В итоге получается, что увеличение испарения влечет за собой ускоренное утончение нити, а это в свою очередь приводит к возрастанию испарения.

Процесс этот завершается перегоранием — расплавлением — нити в том месте, которое было наиболее тонким. Получается точно по пословице: где тонко, там и рвется. Естественно, что, кроме толщины нити, играют роль и условия ее охлаждения. Например, нити редко перегорают около держателей, способствующих отводу тепла. Если нить перегорит около держателя, то это

означает, что ее толщина в этом месте была много меньше, чем на остальной длине.

Процесс испарения материала нити у электронных ламп менее заметен, чем у осветительных, потому что нити накала электронных ламп работают при меньших температурах. Но сам «механизм» перегорания у них такой же: наиболее интенсивное испарение металла нити происходит там, где она особенно тонка. Лампы прямого накала чаще перегорают, чем подогревные, потому что в лампах прямого накала нити обычно тоньше и, кроме того, условия их охлаждения значительно хуже. Соприкосновение нити накала подогревных ламп с фарфором или сделанным из другого материала изолятором, отделяющим нить накала от катода, способствует хорошей теплоотдаче.



Совершенно очевидно, что даже небольшой перекал весьма укорачивает продолжительность жизни нити накала — процесс утончения тонких мест при перекале происходит с увеличенной интенсивностью. Для иллюстрации стоит привести одну цифру: увеличение испарения вольфрама при повышении его температуры пропорционально 38-й степени температуры, т. е. пропорционально T^{38}.

ПРЕДОХРАНИТЕЛИ *перегорают при включении*

Очень редко случается, что предохранитель в радиоприемнике или телевизоре перегорает во время работы. Обыкновенно предохранитель перегорает в момент включения. Вчера вы сами выключили свой приемник по окончании приема. Сегодня включаете его — не работает. Ос-

мотр показывает, что перегорел предохранитель, следовательно, это могло произойти только в момент включения.

Чем же это объясняется?

Нити накала ламп делаются из металла. Сопротивление металлов элетрическому току при нагревании увеличивается. В этом легко убедиться. Чему, например, равно сопротивление нити накала лампы 6К4П. Мы знаем, что напряжение ее накала равно 6,3 *в*, а ток — 0,3 *а*. Отсюда по закону Ома определяем сопротивление:

$$R = 6{,}3 : 0{,}3 = 21 \text{ ом}.$$

Вооружимся омметром и измерим сопротивление нити накала этой лампы, приложив его щупы к штырькам *3* и *4*. Омметр покажет всего 4 *ом*.

Чему же верить — вычислению или измерению?

И тому и другому. Обе величины правильны.

Омметр показал нам сопротивление холодной нити, а расчет мы производили применительно к нормальному режиму работы лампы, так как именно в этих условиях ток ее накала равен 0,3 *а*. Сопротивление холодной нити накала равно 4 *ом*, а «горячей» — 21 *ом*.

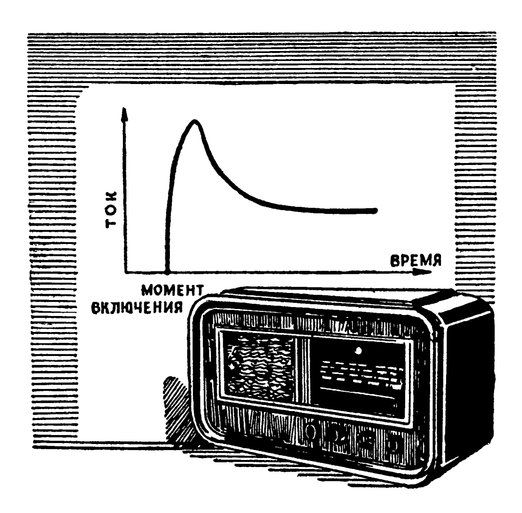
Мы можем проделать такой же опыт и с осветительной лампой. Стоваттная 127-вольтовая лампа имеет расчетное сопротивление 160 *ом*, а омметр при измерении сопротивления холодной нити покажет всего 13 *ом* — в 12 с лишним раз меньше расчетной величины.

Если бы сопротивление нити накала лампы 6К4П при нагревании не увеличивалось, то ток ее накала равнялся бы не 0,3, а 1,5 *а*.

В момент включения нити ламп не нагреты, поэтому через них течет очень сильный ток, в несколько раз превышающий нормальный ток накала. По мере разогрева нитей их сопротивление увеличивается и ток уменьшается. Ток будет наибольшим в момент включения, когда нити накала еще совсем не нагреты, и их сопротивление минимально. Поэтому в момент включения приемника, телевизора или усилителя наблюдается бросок тока, по величине в несколько раз превышающий ток, потребляемый в нормальном установившемся режиме.

Этот бросок тока может пережечь предохранитель, если он взят без должного запаса или если имевшийся запас оказался утраченным.

Может случиться, что запас прочности предохраните-



ля невелик, т. е. ток, пережигающий предохранитель (ток плавления его проволочки), лишь немногим превышает нормальный бросок тока, получающийся при включении аппарата. В таком случае достаточно некоторого увеличения напряжения сети относительно его номинальной величины, чтобы предохранитель в момент включения перегорел.

Бывает и так, что вначале предохранитель имел нужный запас прочности, но с течением времени те же причины, которые приводят к перегоранию нитей накала (см. стр. 56), способствовали образованию у проволочки предохранителя участков с меньшим диаметром. Эта проволочка не находится в вакууме; при нагревании она окисляется и ее диаметр уменьшается. В конце концов на каком-нибудь из участков проволочки диаметр настолько уменьшается, что она не выдерживает тока включения приемника и перегорает. Поэтому предохранители обычно перегорают не сразу после установки, а спустя некоторое время их эксплуатации.

Таким образом, предохранители чаще всего перегорают при включении аппарата. Но в некоторых случаях они могут перегорать и при его выключении.

В момент выключения развиваются экстратоки, которые и пережигают предохранитель. В приемниках с полупроводниковыми триодами экстратоки часто выводят из строя и эти триоды, если не приняты специальные меры.



Электронная лампа известна всем. Она необходимая деталь каждого радиоприемника, телевизора, магнитофона, если не считать, конечно, тех, где она заменена транзисторами. Каждая лампа нуждается в электропитании и потребляет от анодной батареи и батареи накала ток.

Величина тока накала зависит от данных нити накала лампы — от ее сопротивления в рабочем (нагретом) состоянии и от напряжения источника питания. А от чего зависит величина анодного тока, текущего через лампу?

Вопрос как будто нетрудный. Величина тока в цепи равна величине подведенного к ней напряжения, деленной на величину сопротивления цепи. Если к электронной лампе подвести, допустим, 100 *в*, приложив плюс к аноду, а минус к катоду, то через лампу потечет ток, величина которого определится сопротивлением лампы.

Но тут человека, знающего электротехнику и начинающего знакомиться с радиотехникой, подстерегают неожиданные трудности. В самом деле, что является сопротивлением в электронной лампе? Пространство между анодом и катодом лампы пусто, из него выкачан воздух (фактически откачка не бывает идеальной, и в баллоне лампы есть остатки газа, но они в нашем примере не играют роли). А чему же равно сопротивление пустоты?

Знакомая нашему человеку электротехника этот вопрос обходила молчанием, она его не рассматривала. Вот твердое вещество, жидкое, газообразное, пусть даже плазма — здесь все достаточно ясно! Изоляторы, проводники, полупроводники — все это тоже известно! А пустота? Какое же сопротивление там, где «ничего нет»?

Наш электрик может попробовать рассуждать, например, так.

Очевидно, пустота — изолятор. Ведь электрический ток представляет собой движение зарядов, а в пустоте

зарядов нет, поэтому и ток в ней возникнуть не может. А раз так, то, значит, пустота — изолятор. Это, кстати, легко проверить. Возьмем электронную лампу и приложим щупы омметра к ее аноду и катоду — прибор ничего не покажет. Сопротивление промежутка анод — катод равно бесконечности. Следовательно, пустота—изолятор.

Однако, подумав, наш электрик сообразит, что тут что-то не то. Ведь лампа-то работает, значит, через пустоту ее внутреннего пространства ток проходит. Да и не только в лампе. Например, последние достижения в изучении космического пространства показали, что некоторые процессы на Солнце сопровождаются извержением электронов, которые через пустоту межпланетного пространства прекрасно достигают Земли. А ведь движение электрона — это ток. Значит, пустота не изолятор. Пожалуй, даже наоборот. Заряды, двигаясь в ней, не встречают препятствия. Значит, у пустоты вроде нет никакого сопротивления.

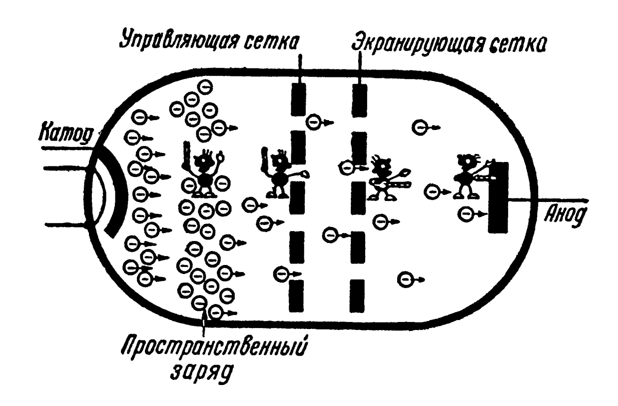
Следовательно, заряды двигаться в пустоте могут. Но все же пустота по сравнению с проводниками, полупроводниками и изоляторами является особой средой. И в проводнике, и в полупроводнике, и в изоляторе заряды есть. Мы рассматриваем проводимость этих материалов с точки зрения возможности движения тех зарядов, которые там уже есть. А в пустоте их нет, но если ввести их туда, то они смогут двигаться там с меньшими препятствиями, чем в любой другой среде.

Из этого уже легко понять, чем определяется величина тока, текущего через электронную лампу. В пространство между ее катодом и анодом вводятся электроны, для чего используется термоэмиссия катода — катод нагревается и испускает электроны. Если все излучаемые катодом электроны достигают анода, то соответствующий ток будет наибольшим. После этого можно увеличивать анодное напряжение, но анодный ток возрастать не будет.

В действительных условиях работы лампы вся эмиссия катода не используется, фактический анодный ток бывает меньше тока эмиссии катода. Представим себя на месте электрона, вылетевшего из катода. Мы испытываем притяжение положительно заряженного анода, но одновременно мы испытываем и отталкивание тех электронов, которые вылетели раньше нас и в своем движе-

нии к аноду находятся между нами и анодом (ведь у этих электронов заряд отрицательный). Это еще не все. Мы получили при вылете некоторую скорость, благодаря чему отлетели от катода на некоторое расстояние. Теперь между нами и катодом есть некоторое количество электронов, вылетевших позже, которые отталкивают нас от катода. А в самом катоде есть положительные ионы, которые притягивают нас к себе.

Таким образом, на вылетевший из катода электрон действуют противоречащие друг другу силы: полученная при вылете скорость увлекает его к аноду, положительное напряжение на аноде стремится продвинуть его ту-



да же, электроны, вылетевшие ранее, отталкивают его обратно к катоду, электроны, вылетевшие позже, отталкивают его к аноду, положительные ионы, имеющиеся в катоде, притягивают его к катоду.

Очень сложно? Да, сложно! Но это еще не конец. На пути между катодом и анодом есть одна или несколько сеток, потенциал которых помогает электронам лететь к аноду (положительный потенциал) или же препятствует этому (отрицательный потенциал). От результирующего действия всех этих причин и зависит то количество электронов (из числа вылетающих из катода), которое будет добираться до анода, образуя анодный ток лампы. Остальные вылетевшие из катода электроны будут отчасти образовывать облачко между катодом и сеткой, отчасти же (наименее быстрые) будут падать обратно на катод.

Вот от каких причин зависит величина тока, текущего через лампу. Если мы хотим по привычке сказать, что величина тока в анодной цепи лампы зависит от величины анодного напряжения и сопротивления лампы, то сумму всех указанных причин (плюс величину эмиссии катода) мы должны будем считать сопротивлением лампы. Тогда мы вполне логично можем сказать, что сопротивление лампы есть переменное сопротивление, потому что достаточно чуть изменить, например, потенциал ее сетки, как анодный ток лампы станет больше или меньше (полагаем, конечно, что эмиссия лампы еще не исчерпана). Изменяя потенциал сетки, можно изменять анодный ток лампы от нуля — лампа «заперта» — до наибольшего значения — используется вся эмиссия катода.



Почему лампа усиливает

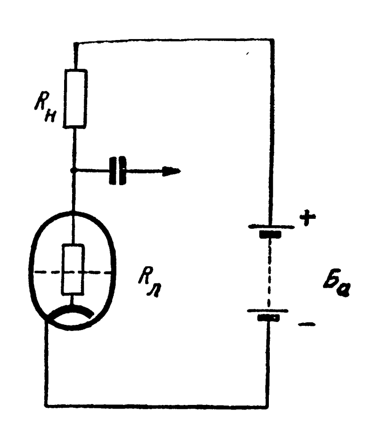
Почему применение электронных ламп дает возможность усиливать электрические колебания? Ниже приводится один из способов объяснения этой особенности электронных ламп.

Электрическая цепь усилительного каскада состоит из источника тока, лампы и нагрузочного сопротивления (источник питания накала лампы не имеет принципиального значения, и мы рассматривать его не будем).

Чем определяется величина тока, текущего в рассматриваемой цепи? Напряжение анодной батареи $Б_а$ постоянно. Нагрузочное сопротивление $R_н$ тоже не изменяется. Остается, следовательно, только одно сопротивление — лампа $R_л$. Очевидно, величина тока в цепи зависит от этого сопротивления.

В предыдущем очерке мы говорили о том, что сопротивление лампы необычное. Его физически нельзя при-

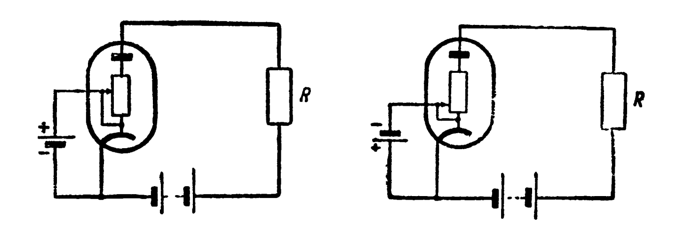
равнять к проводникам, полупроводникам или изоляторам. Величина тока, текущего через лампу в нормальных условиях — при присоединении к ней анодной батареи плюсом к аноду и минусом к катоду, зависит от ряда рассмотренных условий. Поскольку величина напряжения источника анодного питания, эмиссия катода и другие условия в процессе работы лампы не изменяются, то величина тока через нее определяется только потенциалом сетки. Наше сравнение лампы с переменным сопротивлением позволит нам наглядно объяснить механизм усиления лампового каскада. Такое толкование вовсе не имеет целью ниспровержение распространенных теорий работы лампы и каскада с лампой, но мы надеемся, что оно поможет читателю нагляднее представить себе картину того, что происходит в радиолампе, и почему она усиливает.



Итак, наш каскад состоит из анодной батареи, лампы и нагрузочного сопротивления. Лампу мы считаем переменным сопротивлением, величина которого определяется потенциалом сетки $R_л$. При отсутствии сигнала потенциал сетки постоянен и напряжение распределяется в цепи в соответствии с величинами сопротивлений $R_н$ и $R_л$. При их равенстве падение напряжения на них будет одинаковым.

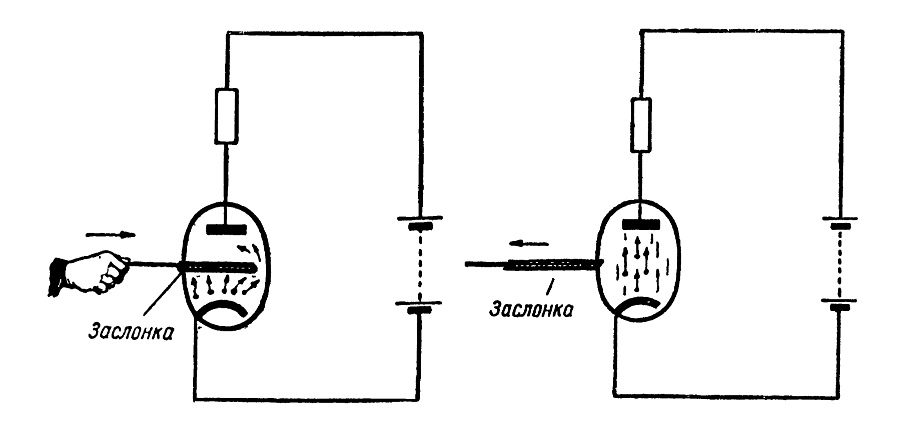
Что произойдет, если на сетку лампы поступит сигнал и начнет изменять величину ее потенциала, а вместе с тем и величину сопротивления лампы $R_л$? Очевидно, что при этом будет происходить перераспределение падений напряжения в цепи. Если сопротивление $R_л$ станет меньше (потенциал сетки стал более положительным), то падение напряжения на $R_л$ уменьшится, а на $R_н$ увеличится. При изменении потенциала сетки в обратную сторону произойдет обратное — падение напряжения на $R_н$ уменьшится.

Таким образом, колебание напряжения на сетке приведет к колебаниям напряжения на нагрузочном сопро-



тивлении $R_н$. Форма этих колебаний будет одинакова, т. е. колебание напряжения на $R_н$ в точности повторит колебания потенциала сетки и связанного с ним изменения величины $R_л$.

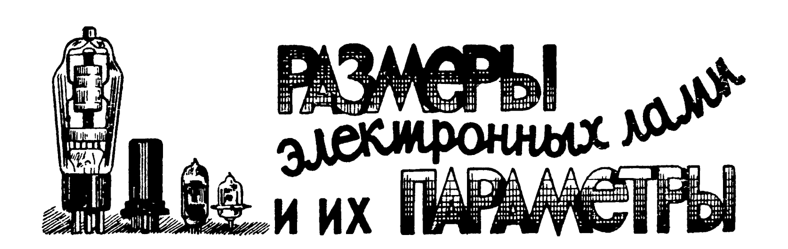
Малое изменение потенциала сетки — малое напряжение сигнала — изменяет величину $R_л$, вследствие чего изменяется падение напряжения на нагрузочном сопротивлении $R_н$. А это колебание напряжения на $R_н$ представляет собой выходное напряжение каскада. По-



лучается, что небольшое напряжение сигнала (переменное напряжение) вызывает возникновение на нагрузочном сопротивлении $R_н$ переменного напряжения по характеру изменения совершенно такого же, но с гораздо большей амплитудой, т. е. усиленного.

Так усиливает ламповый каскад. Усиление это происходит за счет расходования энергии анодной батареи — увеличение тока через лампу приводит к увеличению отдачи энергии батареей.

В популярных книгах часто сравнивают действие сетки не с изменением сопротивления лампы, а со своего рода заслонкой, пропускающей от катода к аноду больший или меньший ток.



Крутизна характеристики является важнейшим параметром электронных ламп. Особенно важна большая величина крутизны у ламп, предназначенных для работы на ультравысоких частотах.

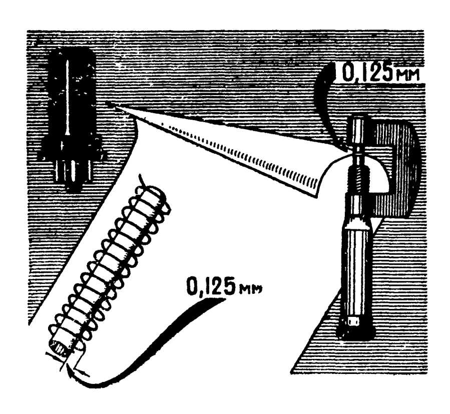
Способы достижения большой крутизны хорошо известны. Основным из них является увеличение эмиссии катода и приближение управляющей сетки к катоду.

До какого же предела в этом направлении можно дойти? Это можно очень хорошо показать на примере пентода 6Ж4. У этой лампы большой катод, имеющий повышенную мощность накала, а сетка находится от катода на расстоянии всего лишь 0,125 *мм*.

0,125 *мм* — это толщина листа писчей бумаги. На таком расстоянии находится сетка от катода, раскаленного до 800—900° С. Достаточно малейшей деформации сетки, чтобы между нею и катодом произошло короткое замыкание. У ламп более поздних разработок расстояние между катодом и сеткой еще меньше и доходит до 0,05 *мм*! Изготовление таких ламп требует необычайно высокой точности производства и значительно более трудно, чем изготовление обычных ламп.

Однако увеличение крутизны лампы путем применения больших катодов и приближения сетки к катоду приводит к возрастанию емкости управляющая сетка —

катод, т. е. входной емкости лампы, что весьма нежелательно на ультравысоких частотах, так как это приводит к уменьшению усиления. «Выручает» тут только то, что при уменьшении расстояния между катодом и сеткой крутизна возрастает в большей степени, чем емкость. Между этими величинами существует интересная зависимость: емкость между сеткой и катодом возрастает пропорционально уменьшению расстояния между ними,



а крутизна характеристики растет пропорционально квадрату той же величины. Если емкость увеличится, скажем, в 2 раза, то одновременно с этим крутизна возрастет в 4 раза и в результате соотношение между крутизной и емкостью окажется более выгодным.

Эта благоприятная для крутизны зависимость подсказала пути дальнейшего развития ламп — уменьшение их размеров.

Предположим, что у обычной лампы конструкция изменена: ее электроды укорочены и сближены таким образом, что расстояние между ними уменьшилось в 2 раза, а поверхность электродов — в 4 раза. Как скажется это на крутизне характеристики и емкости сетка — катод?

В результате уменьшения поверхности в 4 раза и расстояния между электродами в 2 раза емкость уменьшится в 2 раза. Иначе обстоит дело с крутизной. Уменьшение активной поверхности катода в 4 раза повлечет за собой четырехкратное уменьшение крутизны, так как эмиссия катода пропорциональна его активной поверх-

ности. Уменьшение же в 2 раза расстояния между сеткой и катодом приведет к увеличению крутизны тоже в 4 раза, и в результате крутизна не изменится, она останется такой же, какой была до уменьшения электродов. Следовательно, уменьшение электродов привело к снижению емкости при неизменной величине крутизны: соотношение между емкостью и крутизной стало более выгодным — оно увеличилось вдвое.

В этом отношении уменьшение размеров ламп дает хорошие результаты. Поэтому и «пальчиковые» лампы относительно лучше обычных, т. е. наших «старых» стеклянных и металлических ламп с октальным цоколем. Геометрические размеры «пальчиковых» ламп уменьшены; кроме того, у них, как и у ламп-желудей, приняты меры для уменьшения емкости между штырьками. В результате даже у таких сравнительно простых «пальчиковых» ламп, как 6Ж1П и 6Ж3П, удалось получить хорошее соотношение между емкостью и крутизной, что позволяет эффективно использовать их для работы на ультравысоких частотах.

Еще лучше с этой точки зрения сверхминиатюрные лампы.



Спросите у опытного радиолюбителя: лампы скольких типов выпускает сейчас наша промышленность? Думаем, что он Вам не сумеет ответить. Да и не только радиолюбитель, но и радиоспециалист не сумеет дать ответ на этот вопрос—так велико разнообразие типов приемных и усилительных ламп в наше время.

Иначе обстояло дело на заре радиолюбительства. Вначале выпускалась всего одна универсальная лампа—триод типа Р-5, которая выполняла в радиоприемнике

самые разнообразные функции, была, так сказать, лампой на все руки. Это был триод с вольфрамовым катодом прямого накала. Питание ламп в ту пору осуществлялось от батарей или от аккумуляторов, так как подогревного катода, который допускает питание от осветительной сети, еще не было. Такой способ питания был разорительным, так как вольфрамовая нить накала требовала очень высокой рабочей температуры — более 2000° С, а для этого нужна была и большая электрическая мощность.

Следующим шагом в развитии приемно-усилительных радиоламп было появление ламп «микро», или «микрушек», как их ласкового называли радиолюбители. Эти лампы с торированным катодом потребляли в 10 раз меньший ток накала, обладая такими же параметрами, как и лампы Р-5. Но и для тех и для других ламп требовались, кроме того, и источники анодного напряжения примерно около 80 *в*. Восьмидесятивольтовая батарея была, во-первых, громоздкой, и, во-вторых, относительно дорогой. И вот тут-то радиолюбителей выручила лампа не с одной, а с двумя сетками: Микро-ДС. Вторая, вспомогательная, сетка у этой лампы располагалась не так, как у современных тетродов или пентодов, т. е. не между управляющей сеткой и анодом, а в другом месте — вблизи катода, между ним и управляющей сеткой, и потому получила название катодной. На эту сетку подавалось небольшое положительное напряжение — несколько вольт — и она помогала электронам оторваться от катода и приобрести некоторую добавочную скорость. Благодаря этому такие «разогнавшиеся» электроны легче достигали затем анода и на него оказывалось достаточным подать уже не 80, а всего 10—12 *в*.

Поставьте себя на место радиолюбителя того времени — с тремя-четырьмя батарейками для карманного фонаря он получал такие же результаты, как раньше с громоздкой и дорогой анодной батареей. Для ламп Микро-ДС требовалось такое же низкое напряжение питания, как для современных транзисторов!

На лампах Микро-ДС было осуществлено много удачных радиолюбительских конструкций приемников с «низковольтным» питанием. Но для появившихся вскоре после этого подогревных ламп с питанием от осветительной сети проблема анодного питания отпала — осве-

тительная сеть позволяла дешево и просто получить напряжение нужной величины.

Почему же двухсетка не сохранилась в серии ламп прямого накала, где проблема экономичного питания никогда не сходила со сцены? А дело в том, что экономичность этих ламп кажущаяся. Они, действительно, требуют очень небольшого анодного напряжения, но зато потребляют от анодной батареи гораздо больший ток, чем лапы без катодной сетки. Эта сетка оказалась очень прожорливой. Повышение экономичности значительно эффективнее достигалось путем усовершенствования катода и конструкции ламп с обычным расположением сеток.

Так лампа с катодной сеткой надолго сошла со сцены.

И вот, несколько лет назад, мы снова столкнулись с лампами с катодной сеткой. Но на этот раз она имела совсем другое назначение.

Дело в том, что в современных приемниках импульсных сигналов — телевизионных и радиолокационных — необходимо иметь лампы с очень большой крутизной характеристики, позволяющие осуществлять усиление в широкой полосе частот. И здесь пришлось вспомнить об особенностях катодной сетки. Чтобы понять их, рассмотрим несколько подробнее процессы, происходящие в лампе.

Не все оторвавшиеся от катода электроны достигают анода, многие из них застревают в промежутке между катодом и управляющей сеткой, образуя там электронное облачко — пространственный заряд. Сетка как бы командует электронами пространственного заряда — пропускает их к аноду в большем или меньшем количестве. Таким образом, пространственный заряд и служит по существу источником электронов, за счет которого происходит изменение анодного тока лампы. Это облачко электронов называют иногда действующим или виртуальным катодом.

Главная особенность виртуального катода заключается в том, что его диаметр значительно больше, чем диаметр обычного раскаленного катода, а следовательно, больше и его активная поверхность, поставляющая электроны для создания анодного тока. В вертуальном катоде очень много свободных электронов и находятся

они очень близко от управляющей сетки. Все это приводит к тому, что малейшие изменения напряжения на управляющей сетке вызывают большие изменения анодного тока, т. е. увеличивается важнейший параметр лампы — крутизна ее характеристики, имеющая, как уже отмечалось, решающее значение для эффективного усиления. К тому же входная емкость таких ламп оказывается меньше, чем у обычных, что также имеет немаловажное значение.

Как и всегда, за преимущества приходится расплачиваться. В лампах с катодной сеткой платой является дополнительный расход тока от источника питания, вследствие чего, как указывалось ранее, для батарейных приемников эти лампы в конечном счете оказались невыгодными. Ведь ток катодной сетки может даже превышать по величине анодный ток лампы!

Но новые лампы с катодной сеткой питаются от осветительной сети и лишний расход тока не имеет сколько-нибудь существенного значения, а в то же время он с лихвой оправдывается теми достоинствами, которые приобретает лампа.

У нас лампами этого типа являются пентоды 6Ж20П, 6Ж21П, 6Ж22П.



Аноды усилительных ламп во время работы сильно греются. У мощных усилительных ламп они нагреваются настолько, что раскаляются докрасна. У больших генераторных ламп необходимо специальное охлаждение анодов — водяное или воздушное, иначе они могут расплавиться.

А почему же аноды греются?

Ответ как будто не вызывает затруднений: нагрев производит электрический ток. Через лампу течет анодный ток и разогревает анод, все электроды, через кото-

рые он проходит, и вообще всю лампу. Прохождение электрического тока всегда сопровождается выделением тепла. Петербургский ученый Ленц и одновременно с ним англичанин Джоуль вывели известный в физике закон, гласящий, что при прохождении тока в цепи выделяется тепло в количестве

$$Q = 0{,}24RI^2t \text{ кал},$$

где R — сопротивление цепи;
I — величина тока;
t — время.

Эта формула не вызывает сомнений, но в нее входит R. Где же в нашем случае это R?

Действительно, для того чтобы энергия электрического тока превратилась в тепло, надо, чтобы ток встретил на своем пути сопротивление. Образующие электрический ток электроны, сталкиваясь с частицами вещества, отдают им свою энергию, увеличивая размах их колебаний или скорость, а это и есть то, что мы называем нагреванием.

Но в лампе нам не удастся найти сопротивление, пригодное для выделения в нем тепла. Пространство между катодом и анодом электроны пролетают почти без столкновений, поэтому тепло в нем не выделяется (см. стр. 54). Остается анод. Анодный ток, безусловно, течет через анод, который представляет собой определенное электрическое сопротивление.

Но это сопротивление чрезвычайно мало и выделяющееся в нем тепло ничтожно. В этом легко убедиться на опыте. Анодный ток оконечной лампы радиоприемника, такой, например, как 6П3С, составляет около 50 *ма*. Возьмите негодную лампу 6П3С, разбейте ее баллон, выньте анод и включите его в цепь, в которой будет поддерживаться ток 50 *ма*. Вы увидите, что анод совершенно не нагреется.

Этот результат легко подтвердить вычислением. Сопротивление анода оконечной лампы равно примерно 0,01 *ом*, анодный ток — около 0,05 *а*. Из приведенной выше формулы Ленца—Джоуля следует, что в течение секунды при таком токе на аноде выделится 0,000006 *кал*. Надо в течение 46 *ч* поддерживать ток 50 *ма*, чтобы на аноде выделилось такое количество тепла, какое нужно

для нагрева 1 *см*³ воды на 1° С. Поэтому о сколько-нибудь заметном нагревании анода анодным током говорить не приходится.

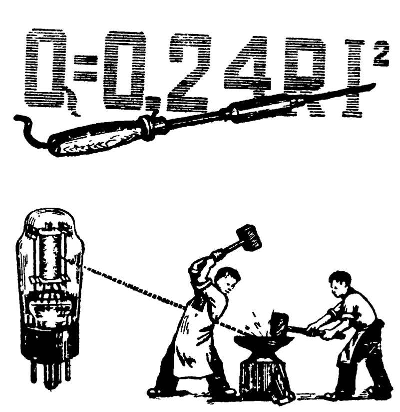
А все-таки анод нагревается. И нагревается очень сильно. В чем же тут дело?

Анод нагревается анодным током, но это не то обычное нагревание, какое производит ток, проходя по проводнику. Анод нагревается в результате резкого торможения электронов.

Электроны несутся в пространстве катод — анод со скоростью, измеряемой тысячами километров в секунду (см. стр. 27). Достигнув анода, они продолжают движение в нем, но уже со скоростью, измеряемой миллиметрами в секунду. На поверхности анода происходит резкое торможение электронов, электроны ударяются о частицы материала анода и отдают им свою энергию движения. В результате кинетическая энергия превращается в тепловую и анод нагревается.

С таким нагревом ударами мы часто встречаемся в жизни. Возьмите молоток и сильно ударьте им несколько раз по куску металла—металл заметно нагреется. Так и электроны, в несметном количестве ударяясь об анод, нагревают его.

Разумеется, по сути дела в этом случае «механизм» нагревания такой же, как и при прохождении тока через сопротивление: электроны, сталкиваясь с частицами вещества, отдают им свою энергию. Но вследствие большей скорости электронов тепла выделится гораздо больше.





В результате электронной бомбардировки аноды ламп нагреваются. Это опасно в двух отношениях. Во-первых, при слишком высокой температуре анода из металла может начать выделяться газ. Во-вторых, нагрев анода создает дополнительный нагрев катода. Для оксидных катодов, работающих при сравнительно низкой температуре, это может оказаться губительным, потому что оксидные катоды при перегреве быстро теряют эмиссию.

Как можно уменьшить нагрев анода?

Самый простой способ — увеличить поверхность анода, с тем чтобы на каждый его квадратный сантиметр приходилась меньшая мощность рассеяния. Но этот способ связан с увеличением общих размеров лампы, что удорожает ее и увеличивает размеры аппаратуры. Чтобы понизить температуру анода, не увеличивая его размеров, надо найти возможность отводить выделяющееся на нем тепло. Поскольку анод находится в вакууме, осуществить отвод тепла можно только лучеиспусканием.

Из физики известно, что наилучшим лучеиспусканием обладают черные тела. Эта особенность и использована для охлаждения анодов. Опыты показали, что черненые аноды нагреваются значительно меньше нечерненных, выполненных из такого же материала.

Аноды приемно-усилительных ламп делаются из никеля. Существует несколько способов чернения никеля. Лучшие результаты в отношении лучеиспускания дает карбонизация — нанесение на поверхность никеля тонкого слоя углерода, осуществляемое путем отжига никеля в парах бензола и водорода.

Карбонизированный анод выдерживает в 4—5 раз бóльшую мощность, чем некарбонизированный. Применение таких анодов позволило значительно уменьшить размеры оконечных ламп. У малогабаритных ламп, имеющих электроды малых размеров, приходится чернить аноды не только оконечных, но и всех вообще ламп.



Если снять заднюю стенку работающего приемника, то нередко можно увидеть красивую картину — свечение анода, а иногда и баллона лампы голубым светом. По своему характеру оно напоминает красное свечение электродов неоновых ламп. У неоновых ламп электроды как бы покрыты «слоем» красного света толщиной 1—2 *мм*. Такой же светящийся «слой» образуется и у электродов оконечных ламп радиоприемников, только он кажется несколько более тонким, часто бывает несплошным, образуя пятна различной величины и формы, и окрашен в очень красивый голубой цвет.

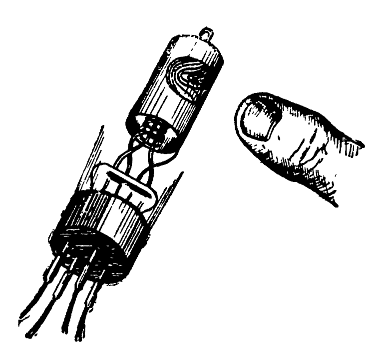
Светящийся «слой» нестабилен. Он пульсирует в такт со звуками радиопередачи.

Среди радиолюбителей и радиослушателей широко распространено убеждение, что это свечение обусловлено наличием в баллоне лампы газа. Поэтому свечение считают признаком брака лампы.

На самом деле такое свечение объясняется не присутствием в лампе остатков газа, а люминесценцией, т. е. тем же физическим явлением, которое вызывает свечение экрана электронно-лучевых трубок, оптического индикатора настройки и т. п. Одинакова и причина возникновения люминесценции — бомбардировка потоками электронов. Электроны, с силой ударяясь о молекулы люминесцирующего вещества, приводят их в «возбужденное» состояние, которое выражается в том, что один из электронов атома перескакивает со своей орбиты (оболочки) на другую, характеризующуюся бо́льшим энергетическим уровнем. Возвращаясь на свою орбиту, электрон выделяет излишек энергии в виде излучения фотона, или светового кванта — мельчайшей «частицы» света.

Что же в данном случае является люминофором — светящимся веществом? Таким люминофором являются различные посторонние случайные вещества, покрываю-

щие металлическую поверхность электродов. К ним относятся испарения оксидного слоя катода, осаждающиеся на электродах, а также вещества, перешедшие на электроды с пальцев людей, производивших сборку лампы. На языке вакуумщиков все эти вещества объединяются общим названием «грязь». Эта «грязь» и является случайным люминофором, приводящим к свечению электродов лампы.



Откуда же берутся электроны, «возбуждающие» люминофор? Чем объяснить то, что светится не только внутренняя поверхность анода, но часто и его внешняя поверхность, а иногда и внутренняя часть баллона?

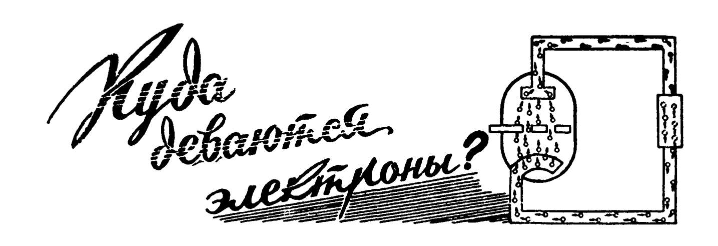
Внутренняя часть анода ламп светится под прямым воздействием анодного тока. Но следует учесть, что не все электроны, вылетающие из катода, достигают анода. Часть их пролетает мимо, с силой ударяется о стекло баллона и выбивает из него вторичные электроны (так называемый динатронный эффект). Эти электроны притягиваются анодом, ударяются об его внешнюю поверхность и заставляют светиться покрывающий его случайный люминофор. Ударяясь о стекло, электроны заставляют светиться и его. Поток электронов пульсирует в соответствии с изменениями потенциала управляющей сетки и напряжения на аноде, происходящими в соответствии с модуляцией принимаемой передачи. Эта пульсация физически представляет собой изменение скорости и числа электронов, составляющих анодный ток. Естественно, что вместе с этим изменяется и свечение, яркость которого находится в прямой зависимости от числа и скорости бомбардирующих люминофор электронов.

Легко объяснить и то, что свечение электродов наблюдается преимущественно у оконечных ламп. У этих ламп мощный катод, высокое анодное напряжение и большой анодный ток. Электроды оконченых ламп расположены дальше от катода, чем у малых приемно-усилительных ламп, что создает более благоприятные усло-

вия для проскакивания электронов мимо анода. Кроме того, именно оконечные лампы имеют обычно стеклянные баллоны, сквозь которые хорошо видно свечение.

Таким образом, хотя свечение электродов ламп и нельзя назвать нормальным явлением, поскольку оно объясняется загрязнением электродов и баллона посторонними веществами, его нельзя считать и существенным недостатком, ухудшающим работу лампы и предвещающим ее близкую порчу.

Но это не значит, что в лампах не может быть газа. Иногда «газовые» лампы действительно попадаются. Но в них светятся не поверхность электродов или некоторые части баллона, а все внутреннее пространство лампы. Такие лампы дают сильно искаженный прием и обычно весьма быстро выходят из строя.



Электроны, движущиеся в проводнике и образующие своим движением электрический ток, имеют (см. стр. 26) очень небольшую среднюю скорость. При таких напряжениях, какие применяются в радиоаппаратуре, скорость движения электронов измеряется миллиметрами в секунду.

Зато в вакууме электронной лампы — в пространстве между ее катодом и анодом — электронам открывается свободный путь (см. стр. 27). Скорость движения электронов в междуэлектродном пространстве лампы определяется начальной скоростью их вылета из катода и ускоряющим действием анодного напряжения и напряжений на сетках. Фактически в междуэлектродном пространстве наших приемно-усилительных радиоламп электроны движутся со скоростью порядка 5 000—10 000 *км/ч*.

При сопоставлении скорости движения электронов в проводах и в междуэлектродном пространстве лампы естественно возникает вопрос: куда же деваются электроны, с огромной скоростью пронесшиеся через пространство анод — катод лампы? Ведь электроны, достигнув анода, сразу замедляют свое движение. Они начинают двигаться медленно, а на анод все с той же громадной скоростью прибывают все новые тучи электронов. В результате электроны должны накапливаться на поверхности анода, потому что при малой скорости их движения в металле они не будут успевать стекать с него.

Возникает также другой вопрос: откуда берутся электроны, образующие анодный ток лампы?

Как же разрешается эта «загадка» анодного тока радиолампы?

Конечно, приведенные рассуждения были неверны. Вспомним, чем определяется величина тока. Она определяется числом электронов, протекающих за секунду через поперечное сечение проводника. В любой точке цепи электронной лампы (в любой точке соединительных проводов, катоде, аноде, источниках питания и пространстве катод — анод) через поперечное сечение протекает одинаковое число электронов — величина тока в любой точке цепи одинакова.

В чем же заключалась ошибочность наших рассуждений? Мы пришли к неправильному выводу, заключив, что чем больше скорость электронов, тем больше их будет проноситься за секунду через поперечное сечение проводника. Это заключение было неверным. Поясним это на примере.

Предположим, что по дороге движется колонна людей, идущих рядами по 10 чел. в ряду. Чтобы ряды не мешали друг другу, между ними соблюдается интервал 1 *м*. Наблюдатель, стоящий у дороги, видит, что через ее поперечное сечение за 1 *сек* проходят 10 чел.— один ряд. Так как в течение секунды через поперечное сечение дороги должен пройти один ряд, а ряд от ряда отстоит на метр, то очевидно, что ряды должны двигаться со скоростью 1 *м/сек* = 3 600 *м/ч* = 3,6 *км/ч*.

На пути колонны есть узкий мост, через который может идти только 1 чел. Ясно, что ряд, дойдя до моста, должен будет остановиться и начать переход по одному



человеку. Столь же очевидно, что для того чтобы у моста не создалась пробка и люди, перешедшие мост, успевали снова построиться и продолжать движение прежним темпом, им придется по мосту бежать. Для простоты будем считать, что вся перестройка осуществляется мгновенно и что бегущие люди соблюдают прежний интервал 1 *м*. В этом случае весь ряд, вытянувшийся в цепочку, должен будет перебежать мост за 1 *сек*, а каждый из членов этого ряда будет иметь на пробег всего 0,1 *сек*. Если длина моста 1 *м*, то для преодоления его за 0,1 *сек* бегун должен будет развить скорость 36 *км/ч*.

В результате на нашей дороге ничего не изменится. Через поперечное сечение дороги в любом месте, в том числе и на мосту, будет проходить 10 чел. в секунду. Но скорость движения не будет одинаковой. На дороге она будет составлять 3,6 *км/ч*, а на мосту 36 *км/ч*.

Так же обстоит дело и в электронной лампе. В любом месте анодной цепи лампы за одинаковый отрезок времени проходит одинаковое число электронов. Но «густота» их неодинакова. В проводах они медленно движутся «густой массой». В междуэлектродном пространстве лампы их «строй» становится более редким. Поэтому, чтобы наверстать потерю, образовавшуюся из-за разрежения их рядов, электронам приходится двигаться быстрее.

Сколько названий было у электронной лампы

Всякий новый технический прибор получает при своем появлении на свет название. Часто это название дает конструктор или изобретатель. Первое название может остаться за прибором навсегда, но нередки случаи, когда первое название оказывается не совсем удачным и в дальнейшем заменяется другим, более точно характеризующим прибор.

Не избежала такой смены названий и электронная лампа. Но в отличие от многих других приборов она сменила много названий, да, пожалуй, еще и сейчас ее называют по-разному.

Первые лампы носили у нас название «пустотных реле». Наряду с ним получили некоторое распространение названия «катодное реле», «электродное реле» и «электродный клапан». Имело хождение также название «катодная трубка». В начале 20-х годов начал применяться термин «лампа» в различных вариациях: «пустотная лампа», «катодная лампа», «электронная лампа», «усилительная лампа», «радиолампа».

Такой разнобой названий во многом объясняется работой переводчиков, переводивших названия ламп с различных иностранных языков и не увязывавших их с уже распространенными названиями.

Из всех этих названий наиболее правильным и как будто окончательно утвердившимся является «электронная лампа», хотя наряду с ним часто встречается и «радиолампа».

Названия «реле» и «клапан» теперь не применяются, как полностью не соответствующие принципу действия электронных ламп. Термин «трубка» сохранился лишь в сочетании «электронно-лучевая трубка».



Электромагнитные колебания, используемые для радиопередач, характеризуют длиной волны или частотой. Пожалуй, большинству радиолюбителей и радиослушателей более привычны и понятны длины волн, а не частоты. Длины волн, например, 1 200, 300 и 42 *м* «понятнее», чем соответствующие им частоты: 250 и 1 000 *кгц* и 7,145 *Мгц*.

Но звуковые колебания мы привыкли определять только частотой. Что говорит Вам выражение «звуковая волна длиной 2 *м*? Низкий это тон или высокий? Сразу трудно даже сообразить, можем мы слышать звук с такой длиной волны или не можем.

Между тем звуковые колебания, так же как и электромагнитные, можно характеризовать как частотой, так и длиной волны. Для того чтобы узнать длину электромагнитной волны, надо скорость распространения радиоволн разделить на частоту.

Точно так же надо поступить и для определения длины звуковой волны.

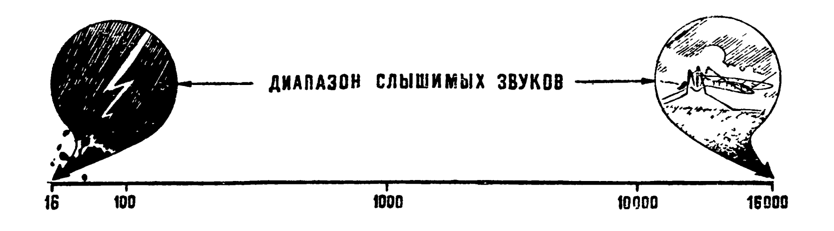
Скорость распространения звуковых волн в воздухе при +15° С и нормальном атмосферном давлении 760 *мм* ртутного столба равна 340 *м/сек*. Следовательно,

$$\text{Длина волны в метрах} = \frac{340}{\text{частота в герцах}}.$$

Из этого выражения легко найти, что длине звуковой волны 2 *м* соответствует частота звука 170 *гц*, так как 340 : 170 = 2. Значит, звуковую волну длиной 2 *м* мы слышать можем. 170 *гц* — довольно низкий тон; это примерно самый низкий тон, какой может воспроизвести женский голос.

Какой же длины звуковые волны мы слышим?

Частотный диапазон органов слуха у разных людей неодинаков, в особенности у его верхней границы. Не



все слушат писк комара или летущей мыши, трескотню цикад, которым соответствуют частоты 12 000—16 000 *гц*. Иные могут наслаждаться полной тишиной южного парка, в то время как другим будет казаться, что парк наполнен трескотней цикад и писком мошкары. Но в среднем человек слышит частоты от 15—16 до 16 000 *гц*. Этим частотам соответствуют длины волн от 21 *м* до 2,1 *см*. Раскаты грома имеют длину волны около 21 *м*, а комариный писк — около 2 *см*.

Человеческий голос способен производить звуковые волны длиной примерно от 4 *м* до 28 *см*, считая по основным частотам. Однако звуки нашего голоса содержат много высших тонов (обертонов), придающих ему тембровую окраску, благодаря чему мы можем узнавать человека по голосу. Длина волны обертонов значительно короче основных частот. Общее представление о спектре человеческого голоса может дать следующая таблица.

Голос	Самый низкий тон		Самый высокий тон		Обертоны до	
	Частота, *гц*	Длина волны, *см*	Частота, *гц*	Длина волны, *см*	Частота, *гц*	Длина волны, *см*
Мужской	80	425	500	68	8 000	4,2
Женский	170	200	1 200	28	10 000	3,4

Наши лучшие радиоприемники воспроизводят без большого ослабления звуковые волны от 5,67 *м* до 3,4 *см* (60—10 000 *гц*).



Звуковые волны мы обычно характеризуем частотой, а не длиной. Объясняется это действительно только привычкой или же нас принуждают к этому какие-либо более веские обстоятельства?

Длина звуковой волны (обозначим ее через λ) зависит от скорости распространения звука. Ее можно определить по формуле

$$\lambda = \frac{v}{f},$$

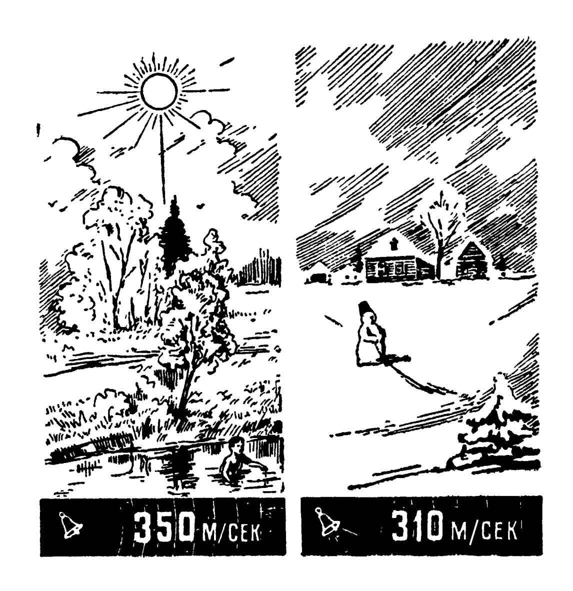
где через f обозначена частота колебаний.

Скорость звука в воздухе — величина переменная и зависит от ряда причин: температуры, атмосферного давления, влажности. Ниже приводится таблица, в которой указана скорость распространения звуковых волн в сухом воздухе при нормальном атмосферном давлении, а также соответствующие этим скоростям длины звуковой волны.

Температура по 100-градусной шкале	Скорость распространения звуковых волн, *м/сек*	Длина звуковой волны λ для частоты 100 *гц*, *см*
—182	181,5	18,1
— 45	305,6	30,6
— 20	318	31,8
0	331	33,1
+ 15	340	34
+ 20	342,5	34,3
+100	387,3	38,7

Третья колонка цифр вычисляется по приведенной выше формуле путем деления v на $f = 1\,000$ *гц*.

Из этой таблицы видно, что скорость звука, а вместе с нею и длина звуковой волны довольно сильно зависят от температуры. В том интервале температур воздуха, какой фактически наблюдается в условиях средних широт, скорость звука изменяется примерно на 15%. Так как на скорость звука оказывает влияние не только тем-



пература, но и степень влажности воздуха и величина атмосферного давления (с увеличением влажности и давления скорость звука увеличивается), фактически возможные изменения длины звуковых волн будут еще больше.

Из сказанного можно сделать вывод, что если бы мы захотели характеризовать звук длиной волны, то нам пришлось бы специально оговаривать температуру, влажность и другие условия, без чего нельзя было бы связать длину волны с каким-нибудь определенным тоном.

В большинстве твердых и жидких тел звук распространяется значительно быстрее, чем в воздухе. Ниже приводятся скорости звука и длины звуковых волн в разных средах.

Вещество	Скорость звуковых волн, *м/сек*	Длина звуковой волны для частоты 1 000 *гц, см*
Вода	1 540	154
Сталь	5 200	520
Стекло	5 300	530
Дерево (вдоль волокна) в среднем	5 000	500
Свинец	1 230	123
Резина	50	5

Как видно из таблицы, в резине скорость звуковых волн примерно в 6 раз меньше, чем в воздухе при обычных температурах, а в стали, стекле и дереве она примерно в 15 раз больше.

Скорость распространения электромагнитных колебаний в пустоте и воздухе практически одинакова и не зависит от температуры, давления и других причин. Но если бы нам пришлось иметь дело с распространением электромагнитных волн в другой среде, где скорость их отличается на заметную величину, то пользоваться длиной волны уже было бы неудобно, так как длины волн не соответствовали бы привычным нам частотам.

Приведем один пример. Скорость радиоволн в пустоте, как известно, равна 300 000 *км/сек* (точнее 299 776 *км/сек*), а в воде — в 9 раз меньше. Частоте 1 000 *кгц* в пустоте и воздухе соответствует длина волны 300 *м*, а в воде — 33 *м*. Как видим, разница весьма существенная. Этим объясняются малые размеры телевизионных антенн, погруженных в жидкость.



Очень немногие живые существа, населяющие нашу планету, могут похвастать тем, что они упоминаются в радиотехнической литературе. К ним принадлежит, например, летучая мышь — живой прообраз локационной станции. К ним относится и комар.

Чем же знаменит комар?

Комары прославились своим писком. Писк комара по высоте своего тона и силе звука лежит на пределе воспринимаемых человеческим ухом частот и уровней громкости. Поэтому комариный писк часто начинает или замыкает собой акустические таблицы и используется для полярных акустических сравнений и примеров.

Какими же цифрами характеризуется писк комара?

Звук, который мы называем комариным писком, порождается крыльями летящего комара. Его частота колеблется в пределах примерно 12—16 *кгц*. Эти частоты предельны для человеческого уха. Их слышат не все. В детские годы человек слышит более высокие частоты, чем в зрелом возрасте. Поэтому даже в лучших, наиболее высококачественных акустических устройствах не добиваются воспроизведения звуковых частот выше 12—15 *кгц*.

Мощность комариного писка составляет около $5 \cdot 10^{-4}$ *эрг*. Так как 1 *эрг* $= 10^{-7}$ *вт*, то излучаемая комаром звуковая мощность составляет:

$$5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-7} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ вт}.$$

Эта мощность в 20 млрд. раз меньше мощности, потребляемой лампочкой от карманного фонаря.

Но ведь наше ухо воспринимает далеко не всю звуковую энергию, излучаемую комаром, а лишь крайне малую ее часть. Эксперименты показывают, что человек с хорошим слухом слышит писк комара на расстоянии 2 *м*. Порождаемая комаром звуковая мощность распределяется при этом на сфере радиусом 2 *м*, площадь которой равна примерно $5 \cdot 10^5$ *см*^{2}. Мощность комариного писка, приходящаяся на 1 *см*^{2} поверхности этой сферы (1 *см*^{2} — площадь входных каналов ушей), составляет всего $25 \cdot 10^{-16}$ *вт*.

Это порог слышимости на таких частотах.

Звуковая волна представляет собой смещение частиц воздуха, имеющее колебательный характер. Частота колебаний определяет собой частоту звука, а от амплитуды колебаний зависит громкость звука. Наше ухо чрезвычайно чувствительно. Наиболее чувствительно оно на частоте 2 300 *гц*. Порог слышимости на этой частоте составляет 10^{-10} *мквт/см*^{2}, что соответствует звуковому давлению $2 \cdot 10^{-4}$ бар. Смещение частиц воздуха при громкости на пороге слышимости равно всего 0,1Å, т. е. меньше поперечника атома.

Колеблющиеся частицы воздуха передают свою энергию барабанной перепонке уха, которая сама начинает колебаться с амплитудами примерно такого же порядка. Однако этих ультрамикроскопических амплитуд достаточно для того, чтобы слуховой нерв получил определен-

ное раздражение, в результате чего у нас рождается ощущение звука.

Несмотря на сверхмалые амплитуды колебаний частиц воздуха, общая масса воздуха, приходящая в колебательное движение, не так мала. Если мы на расстоянии 1 *м* еще различаем писк комара, то при этом колеблется масса воздуха около 44 *кг*. Если мы слышим звук на расстоянии 100 *м*, то при этом в колебательное движение приходит около 2 500 *т* воздуха.



ЛЕТУЧАЯ МЫШЬ — ЖИВОЙ ЛОКАТОР

Скромная летучая мышь прославлена в научно-популярной литературе за ее локационные способности. С поразительной ловкостью летает она в темноте, лавируя между домами, ветвями, проводами и другими препятствиями.

Ученых давно заинтересовало, как ухитряется летучая мышь летать в темноте, не натыкаясь на препятствия. Вначале — это было давно, чуть ли не 200 лет назад — предположили, что она обладает необычайно острым зрением. Для проверки поймали мышь, заклеили ей глаза и выпустили. Результаты были поразительными: ослепленная мышь летала так же ловко, как и зрячая; она ни на что не натыкалась и даже находила добычу.

Но вот однажды попробовали завязать у летучей мыши уши. Наблюдения показали, что мышь, лишенная возможности слышать, стала беспомощной. Она утратила способность летать в темноте и охотиться за насекомыми, которыми она питается.

Может быть, мышь слышит какие-то звуки и руководствуется ими? Для проверки решили выпустить мышь с открытыми ушами (и глазами), но с завязанным ртом. И вот оказалось, что мышь в этом случае летать не может — она натыкается на препятствия.

Дело начало проясняться. Очевидно, летучая мышь издает какие-то неслышимые нами звуки и с их помощью ориентируется в пространстве.

Что же все-таки слышит мышь? Что за звуки она издает?

Загадка была разрешена не сразу. Наблюдения и исследования показали, что летучая мышь издает ультразвуки, частота которых достигает 50 *кгц*. Вполне естественно, что мы не слышим их. Ведь ухо человека воспринимает звуки с частотой не выше 16 *кгц*.

Принципы радиолокации хорошо известны. Радиолокационная станция периодически посылает импульсы радиоволн (зондирующие импульсы) с помощью остро направленной антенной системы.

Посланный станцией зондирующий импульс, встретив на своем пути препятствие, отражается от него и частично возвращается к станции, где и принимается. Зная скорость распространения радиоволн и время, прошедшее между посылкой сигнала и его возвращением в виде эха, легко определить расстояние до препятствия, от которого отразились радиоволны. При скорости 300 000 *км/сек* радиоволна пролетает за 1 *мксек* 300 *м*. Если эхо вернулось через 2 *мксек*, то расстояние до препятствия равно 300 *м*, так как сигнал проделал этот путь дважды — от передатчика до препятствия и от препятствия до передатчика.

Прием эха может быть осуществлен только в моменты молчания передатчика. Отраженный сигнал всегда бывает очень слаб, и посылаемый сигнал полностью заглушит его даже в том случае, если для приема применяется отдельная антенна. В действительности же и прием и передача обычно ведутся на антенну, которая переключается то на прием, то на передачу.

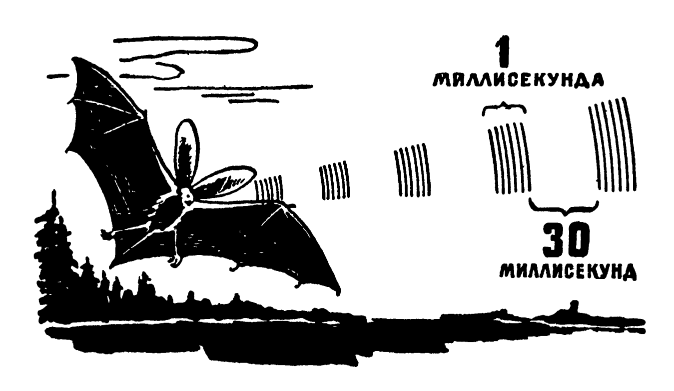
Теперь ясно, почему продолжительность зондирующего импульса определяет минимальную дальность действия локатора. Если импульс продолжается 10 *мксек*, то в течение этого времени приемник не сможет принять эхо, а сигнал пролетит за 10 *мксек* 3 000 *м*. Следовательно, препятствие, находящееся ближе чем в 1,5 *км*, этим локатором обнаружить нельзя.

Столь же понятна и зависимость между интервалом между импульсами и наибольшим расстоянием, на которое может работать локатор. В течение этого интервала сигнал должен дойти до препятствия — цели и возвратиться. Если интервал между двумя зондирующими импульсами равен 1 000 *мксек*, то радиоволна пролетит во

время интервала 30 *км*. За это время сигнал должен проделать путь дважды, поэтому наибольшее расстояние, которое сможет определить локатор, будет равно 15 *км*.

Теперь вернемся к летучей мыши. Ей не приходится измерять большие расстояния. Ее не интересует, что делается дальше примерно 20 *м*. Зато очень важно получать своевременные сведения обо всем, что встречается на пути ее полета вблизи — на расстоянии нескольких метров и ближе, иначе она будет натыкаться на препятствия.

Каждая ультразвуковая посылка — «зондирующий импульс» — длится не больше 1 *мсек*. Ультразвук распространяется в воздухе с такой же скоростью, как и



звук, т. е. в среднем 340 *мсек*. За 1 *мсек* звук пролетает около 34 *см*; следовательно, при такой продолжительности посылки летучая мышь может обнаружить препятствие на расстоянии от 17 *см* и дальше. Так как летучая мышь может делать посылки еще меньшей продолжительности, то она в состоянии «чувствовать» встречные предметы в самой непосредственной близости от себя.

Число посылок в секунду летучая мышь изменяет в соответствии с обстоятельствами. Неподвижная мышь делает в секунду около десяти ультразвуковых посылок. Находясь в полете, она учащает посылки, доводя их число до 30 в секунду и даже больше, в зависимости от расстояния до препятствия, к которому она приближается.

Летучая мышь умело использует свою способность издавать и улавливать ультразвуки и эта способность хорошо дополняет ее другие органы чувств. Достаточно увидеть летучую мышь в полете, чтобы убедиться в том, каким важным и действенным средством ориентировки является для нее эта ее способность. Мышь уверенно летает между деревьями в густом саду, делая головоломные повороты, и своевременно облегает все препятствия, практически не пользуясь при этом зрением, а полагаясь исключительно на свой ультразвуковой «локатор».

Слово «локатор» в предыдущей фразе заключено в кавычки в силу традиции. Ультразвуковой аппарат ориентации летучей мыши является локатором не в переносном смысле. Ультразвуковые гидролокаторы, так называемые асдики, работают подобным же образом: они осуществляют ультразвуковые посылки — зондирующие импульсы, улавливают их отражение от препятствий и по времени и направлению прихода эха определяют направление на объект и расстояние до него. По существу совершенно так же работают и ультразвуковые эхолоты.

Как было сказано, летучая мышь пользуется для целей локации ультразвуком с частотой около 50 000 *гц*. Это очень высокая частота, лежащая далеко за пределами частот, слышимыми человеком. Но сама летучая мышь воспринимает еще более высокие частоты, по-видимому более 70 *кгц*. Способность слышать такие частоты нужна летучей мыши, по всей вероятности, для того, чтобы разыскивать насекомых, которыми она питается. Мышь ловит их на лету, а они своими крыльями порождают ультразвуки, частота которых находится в этих пределах.


Гвачаро

Аналогично эхом пользуется южноамериканская птица гвачаро — обитательница темных пещер. Она излучает мощные отрывистые выкрики высокого тона — с частотой около 7 000 *гц* — и после каждого выкрика улавливает эхо от препятствий.

Для того чтобы пользоваться звуковыми или ультразвуковыми локаторами, живым существам приходится

оценивать такие короткие промежутки времени, как миллисекунды или даже микросекунды. И нам становится немного завидно: птицы и летучие мыши точно измеряют сверхкороткие мгновения, а мы сами при оценке времени способны ошибаться не то что на минуты или десятки минут, но и на целые часы.

Но у нас нет оснований считать себя обиженными. Человек тоже улавливает миллисекунды и их доли. Мы обладаем стереофоническим восприятием звука. Закрыв глаза, мы различаем, что автомобиль сигналит справа, кто-то разговаривает слева и т. п. Как мы это узнаем?

У нас два уха, расставленных примерно на 20 *см*. Если источник звука находится не прямо перед нами или прямо позади, то наше ухо, находящееся ближе к источнику звука, слышит раньше, а более удаленное ухо — позже. Простой подсчет показывает, что при разности расстояния от одного и другого ушей до источника звука 10 *см* более удаленное ухо слышит звук с запаздыванием на 0,3 *мсек*, или на 300 *мксек*. Предел наших возможностей лежит, по-видимому, где-то около 100 *мксек*.

Сравнение радиолокационной станции с летучей мышью интересно закончить некоторыми цифрами. Летучая мышь мала и ее локационный «механизм» — легкие, гортань, слуховой аппарат вместе с ведающей им частью мозга — очень легок; он весит немного больше полуграмма. Мощность излучаемых мышью сигналов — около 10^{-6} *вт*, т. е. одна миллионная ватта. Для сравнения можно взять так сказать «однотипную» радиолокационную станцию — самолетную. Вес такой станции составляет несколько десятков килограммов, а излучаемая мощность бывает порядка десятков киловатт. При этом самолетная радиостанция обнаруживает цели диаметром в несколько метров, а мышь — в десятые доли миллиметра. Если учесть относительную дальность возможного обнаружения, то получается, что локационный аппарат летучей мыши гораздо эффективнее радиолокационной станции.

Многие живые существа пользуются звуками высокой частоты, слышимыми или неслышимыми, для ориентирования в пространстве и поисков добычи. Этот способ познания окружающего мира распространен значительно шире, чем обычно полагают, и летучая мышь вместе с гвачаро отнюдь не феномены. Просто летучая

мышь широко известна и ее способность летать в темноте легко наблюдаема. У других живых существ подметить использование локационных методов труднее. Но, например, дельфины тоже имеют совершенный звуколокационный аппарат и при его помощи в условиях полного отсутствия видимости обходят препятствия и отыскивают добычу. Дельфиньи «посылки» представляют собой короткие щелчки высокого тона, которые при частом повторении (частота повторения меняется в зависимости от надобности) превращается в своеобразный «скрип». Очевидно, дельфин использует и более высокие частоты, поскольку его собственный слуховой аппарат воспринимает ультразвуки с частотами выше 100 000 *гц*.



Этот вопрос не имеет никакого отношения к языку. Совершенно очевидно, что мы можем понять только то, что сказано на известном нам языке. Но для того чтобы понять слово, произнесенное на любом языке, надо уловить составляющие его звуки. Если кто-нибудь произнес слово «миска», то слушающий должен совершенно ясно различить, что первым звуком в этом слове является «м», за ним следует «и» и т. д. Если вместо «и» мы услышим «а», то слово примет совсем другой смысл: получится не «миска», а «маска».

Из этого следует бесспорный вывод: чтобы понимать друг друга, мы должны различать звуки, из которых составляются слова. Мы должны безошибочно отличать звук «а» от звука «о» или «и» и пр.

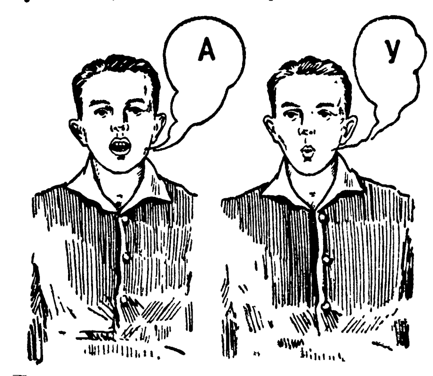
Каким же образом мы достигаем этого? Ведь человеческие голоса так различны по тембру и тону. Иной

пророкочет звук «а» густым шаляпинским басом, а детский голосок пропищит его тонким дискантом, но и в раскатах баса и в тонком детском голосе мы уловим один и тот же звук «а». Мы распознаем звуки независимо от того, как они произнесены — громко или шепотом, мы узнаем их и в крике и в пении.

Механизм этого понимания очень интересен. Оказывается, в каждом гласном звуке есть не менее чем два характерных тона, две, как их называют, форманты, которые и определяют его. Эти форманты должны обязательно присутствовать в звуке, иначе мы не сможем распознать его.

Чем же обеспечивается наличие в произносимом звуке необходимых формант? Оно обеспечивается определенной настройкой полости рта. При помощи языка, щек и соответствующего положения челюстей мы образуем в полости рта два резонирующих объема, которые и подчеркивают нужные форманты. Высота звука — его тон — зависит от размера голосовой щели. Изменяя этот размер, мы можем произнести звук в высоком тоне или низком, но необходимые форманты при этом остаются неизменными.

Попробуйте, например, раскрыть рот, прижать кончик языка к нижним зубам и произнести звук «а». Вы проделаете это очень легко. Но попробуйте теперь, не изменяя формы рта и положения языка, произнести другой звук, например «и», «о», «у» или какой-нибудь другой. Из этой попытки ничего не выйдет. В лучшем случае Вам удастся выдавить из себя лишь неопределенное мычание, не похожее на звучание, соответствующее какой-либо букве, но выдавить даже такой звук будет физически трудно. Этот же опыт можно проделать с любым другим звуком. «Настройте» рот на звук «и» и попытайтесь, не изменяя этой настройки, произнести звук «а» или любой другой. Это Вам не удастся.



У нас выработалась автоматическая привычка

настраивать свой рот нужным образом, и мы не замечаем этого.

Радиоаппаратура должна без искажений донести нужные форманты звуков до нашего уха. Их искажение приводит к потере разборчивости.

Следует отметить, что наше восприятие формант звуков ухудшается с увеличением громкости относительно ее нормального, привычного уровня. Поэтому разборчивость очень громкой радиопередачи ниже разборчивости передачи, громкость которой приближается к естественной. Этим обстоятельством объясняется меньшая разборчивость передачи мощных уличных громкоговорителей по сравнению с комнатным. Об этом же обстоятельстве очень полезно почаще вспоминать и любителям «оглушительной» работы приемников.

Это справедливо не только в отношении громкоговорителей. Когда человек кричит, нам тоже труднее понять его, чем когда он говорит с нормальной громкостью.



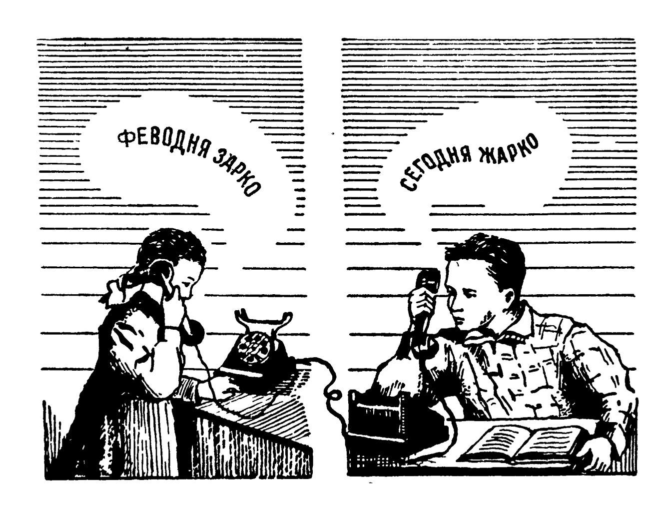
— Седор Феменович, фкажите, любите ли Вы вкуфные фадовые яблоки?

В этой фразе нет опечаток. Она умышленно так написана. Неправда ли, она выглядит смешно? Но попробуйте передать ее по телефону и ваш собеседник будет уверен, что он слышал: «Федор Семенович, скажите, любите ли Вы вкусные садовые яблоки»?

Такая забавная неспособность заметить умышленные искажения происходит из-за особенностей нашей речи и слуха. Большинство согласных звуков содержит в своем составе много высоких звуковых частот, превышающих 5—6 *кгц*. Различное распределение этих составных частот по спектру и приводит к тому, что мы отличаем один согласный звук от другого. В области же низших

частот состав звука некоторых согласных имеет много общего.

Обычный городской телефон пропускает полосу частот примерно 250—3 000 *гц*; более высокие частоты им не воспроизводятся. Поэтому при разговоре по телефону до нашего слуха доходит лишь часть звуковых колебаний, необходимых для распознавания того или иного звука. Мы различаем ряд согласных только по смыслу передаваемого слова и по привычке воспринимать их как те согласные, которые должны стоять в этом слове.



Наибольшее сходство имеется между звуками «с» и «ф». Звук «с» содержит в своем составе частоты 500—8 000 *гц*. Этим между прочим объясняется, что по радио звук «с» передается хуже всех других: столь высокие частоты не воспроизводятся не только телефоном, но и большинством радиоприемников. Звук «ф» требует несколько меньшей полосы частот.

Трудно различить также буквы «ч» и «ш». При разговоре по телефону их можно взаимно переставлять, и собеседник в большинстве случаев не заметит этого, как он не замечает замену звука «с» звуком «ф» и наоборот.

Ниже приводится таблица, характеризующая состав звука для разных согласных.

Звук	Число колебаний в секунду		Звук	Число колебаний в секунду		Звук	Число колебаний в секунду	
	нижнее	верхнее		нижнее	верхнее		нижнее	верхнее
б	91	2 900	к	1 250	3 900	с	500	8 000
в	100	3 400	л	228	1 932	т	900	4 000
г	90	3 400	м	271	2 579	ф	550	6 400
д	90	3 700	н	203	2 169	х	2 000	4 000
ж	80	5 200	п	950	3 600	ч	500	4 800
з	90	7 000	р	20	4 846	ш	450	4 600

У гласных звуков высшие частоты, характерные для того или иного звука, ограничиваются пределом 2 500—3 000 *гц*. Все более высокие частоты в составе этих звуков характеризуют уже не сам звук, а его тембр. Срезав высшие звуковые частоты в звуке «а» или «о», произносимом высоким женским голосом, мы все же услышим тот же звук «а» или «о» и будем слышать его вполне четко. Здесь уже замена одного звука другим, даже при узкой полосе пропускания телефона, невозможна.



Возьмем в руку открытку или какой-нибудь другой кусок плотной тонкой бумаги и проведем по ее краю зубьями расчески. Мы услышим тон некоторой определенной частоты. Если движение руки с расческой ускорить, то тон повысится. Замедление движения руки будет сопровождаться понижением тона.

Но замедлять движение руки с расческой можно только до определенного предела. Когда этот предел будет достигнут, мы перестанем различать тон. Он как бы распадается на отдельные щелчки или стуки, мы будем слышать не тон низкой частоты, а ряд отдельных стуков.

Наше ухо устроено так, что оно перестает разделять звуки в том случае, если интервал между ними меньше $^1/_{15}$—$^1/_{16}$ *сек*. Два звука, разделенные интервалом меньше $^1/_{16}$ *сек*, сливаются в один. Если промежуток между звуками будет больше $^1/_{16}$ *сек*, то звуки «оторвутся» друг от друга.

В нашем примере с расческой тон при замедлении движения руки распадается на отдельные стуки, которые мы слышим потому, что они представляют собой негармонические колебания. Если бы мы производили опыт не с открыткой и расческой, а с телом, способным колебаться гармонически, например струной, то мы просто перестали бы слышать звук тогда, когда его тон понизился бы до 15—16 *гц*.

Интересно, что то же число ($^1/_{16}$) определяет важный порог восприятия и у глаза. Оно характеризует инерционную способность глаза. Наш глаз сохраняет раздражение в течение примерно $^1/_{16}$ *сек*. Если видимое движение распадается на отдельные рывки, но интервалы между ними меньше $^1/_{16}$ *сек*, то мы не различаем рывков и движение кажется нам плавным. На этой особенности глаза основаны кино и телевидение. При передаче более 15—16 кадров в секунду мы уже не замечаем «пульсации» движущихся на экране изображений предметов и людей; движение представляется нам плавным и непрерывным. Но если передать в секунду меньше 15 кадров, то человек на экране уже не будет двигаться плавно; мы начнем различать, что его движение состоит из отдельных рывков или скачков.

7—2408

Минимальная продолжительность тона

Мы соединили звуковой генератор с хорошим динамическим громкоговорителем и прислушиваемся к звучанию различных тонов. Мы можем увеличивать или уменьшать продолжительность звучания тонов, они как будто бы от этого не изменяются. Но так ли это на самом деле?

Нет, не так. В действительности есть определенный предел, дальше которого нельзя укорачивать продолжительность звучания. После этого предела мы перестанем слышать тон, а услышим стук или шум.

Этот предел неодинаков для различных частот. Каждой слышимой частоте соответствует определенное число периодов, которое должно воздействовать на наше ухо, чтобы мы услушали тон этой частоты. При меньшем числе периодов мы не услышим тон, а воспримем звук, лишенный какой-либо определенной тональности.

Меньше всего периодов нужно, чтобы различить тон на низких частотах. Для того чтобы мы услышали тон частотой 50 *гц*, надо, чтобы на ухо воздействовали четыре полных периода этой частоты или, что по существу то же, чтобы звук 50-периодного тока воздействовал на ухо в течение не менее 80 *мсек* (продолжительность одного периода $^1/_{50}$ *сек*, а продолжительность четырех периодов $4:50=0{,}08$ *сек*$=80$ *мсек*). Наименьшая продолжительность звучания нужна на частоте около 2 300 *гц* (частота, к которой ухо наиболее чувствительно). Мы различим тон этой частоты, если он будет звучать всего лишь 15 *мсек*. Этот промежуток времени соответствует 34,5 колебаниям. Ниже приведена таблица, в которой указаны частота, минимальное число периодов, нужное для того, чтобы различить эту частоту, и время звучания, соответствующее этому числу периодов.

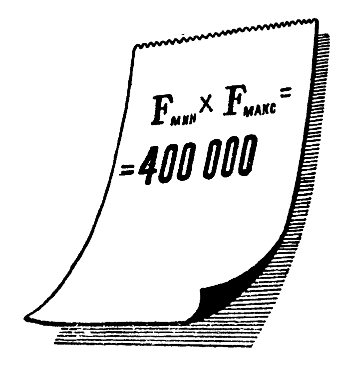
Частота тона, *гц*	Число периодов, нужное, чтобы различить этот тон	Продолжительность звучания этого числа периодов, *мсек*
50	4	80
200	7	35
1 000	16	16
2 300	34,5	15
10 000	300	30

Из таблицы видно, что чем выше частота, тем больше периодов должно воздействовать на наше ухо, чтобы мы различили тон этой частоты.



Каждому радиолюбителю известно, что для улучшения качества звучания, для приближения его к естественному нужно расширить полосу частот, воспроизводимых приемником и громкоговорителем. Но не все знают, что значительное расширение полосы пропускания в сторону только высоких или только низких частот может оказаться не полезным, а, наоборот, вредным.

Опыт показывает, что наше ухо требует сохранения определенного равновесия между воспроизведениями низких и высоких частот. Соотношение между ними можно выразить очень просто: произведение высшей и низшей частот полосы пропускания должно составлять примерно 400 000. Приемник, у которого высшая воспроизводимая частота равна $F_{макс} = 5000$ *гц*, должен иметь низшую частоту $F_{мин}$ порядка 80 *гц* ($80 \cdot 5000 = 400\,000$).



Если у такого приемника (с верхней частотой 5 000 *гц*) улучшить воспроизведение низших частот, расширив полосу пропускания до, скажем, 60 *гц*, то требуемое равновесие нарушится и станут неприятно выделяться низкие частоты. Если громкоговоритель хорошо воспроизводит частоты до 8 000 *гц*, то обязательно нужно расширить диапазон усиливаемых и воспроизводимых низких частот до 50 *гц*, в противном случае будет ощущаться недостаток басов.

Таково одно из правил, диктуемых особенностями нашего слуха.

ГОСТ устанавливаст для радиовещательных приемников следующие границы для частотной характеристики.

Класс приемника	Полоса звуковых частот, *гц*	Произведение
1-й	60 6 500	390 000
2-й	100 4 000	400 000
3-й	150 3 500	525 000
4-й	200 3 000	600 000

Как мы видим, нужное соотношение обеспечено у приемников 1-го и 2-го классов и почти обеспечено у приемников 3-го класса. У приемников 4-го класса равновесие нарушено и звучат они хуже. Это объясняется недостатком низких частот, что имеет место главным образом из-за небольших размеров диффузора громкоговорителя и ящика приемника.

Радиолюбители при конструировании звуковоспроизводящей аппаратуры должны учитывать необходимость такого «баланса» низких и высоких частот.



Вы сидите в театре. Сцена за сценой проходят перед Вашими глазами. Нежный шепот влюбленных сменяется громкими песнями, за еле слышными голосами разведчиков следует громовое «ура!» атакующих бойцов и оглушительная пальба.

Теперь представьте себе на минуту, что кто-то снивелировал все звуки спектакля: шепот усилился до громкости обычного разговора, выстрелы превратились в негромкие хлопки, а герои-бойцы шли в атаку осторожно, вполголоса выкрикивая свое «ура!» Не правда ли, как сразу поблекли бы краски спектакля, насколько серым, бледным, неестественным показался бы он нам.

На языке акустики пределы громкости звучания называются динамическим диапазоном. «Живые» звуки окружающего нас мира изменяют свою громкость во много раз. Отношение наибольшей и наименьшей громкостей звучания выражают обычно в децибелах. Динамический диапазон оркестра характеризуется «полосой» громкости 60—70 *дб*. В переводе на электрическое напряжение это составляет разницу в 1 000—3 000 раз.

Чтобы передать без искажений такой динамический диапазон, у передатчика должна быть обеспечена возможность модуляции в пределах от 100% (форте—фортиссимо) до 100 : 3 000 = 0,03% (пиано — пианиссимо). Но такая ничтожная глубина модуляции, как 0,03%, находится уже на уровне собственного фона передатчика, причем уменьшение уровня фона даже до такой величины связано с большими трудностями. Тем не менее снижение фона является единственным средством расширения динамического диапазона передатчика, так как повысить глубину модуляции свыше 100% невозможно.

Еще бо́льшие трудности возникают при приеме. Наибольшая громкость звучания определяется максимальной неискаженной мощностью приемника, а наименьшая — его собственными шумами и фоном. По ГОСТ



для первоклассных приемников уровень фона и шумов должен быть по крайней мере на 46 *дб* ниже максимальной выходной мощности. Этим и определяется динамический диапазон приемников. У приемников он ограничен значительно более узкими границами, чем у передатчиков. Еще больше «сжимают» динамический диапазон разного рода помехи, особенно сильные в городах.

Таким образом, проблема передачи по радио естественного динамического диапазона еще не решена, а без этого невозможно получить естественное воспроизведение. Одним из возможных выходов из этого положения является перевод части радиовещания на ультракороткие волны (с частотной модуляцией). Возможность глубокой модуляции и отсутствие помех позволяют передать и воспроизвести на ультракоротких волнах более широкий диапазон громкости, чем на длинных, средних или коротких волнах.

Эта особенность передач с частотной модуляцией заметна при работе телевизоров. Именно поэтому телевизоры звучат хорошо даже тогда, когда в них установлены громкоговорители, применяющиеся в радиоприемниках низких классов.



Почему работает электродинамический громкоговоритель

Каждому из нас трудно припомнить такой день, когда бы нам не приходилось пользоваться услугами электродвигателя. Трамваи, троллейбусы и вагоны метро приводятся в движение электродвигателями. В нашем холодильнике, пылесосе, вентиляторе, радиоле, магнитофоне работают электродвигатели.

Вероятно, не менее часто нам приходится пользоваться услугами и громкоговорителей. Громкоговорители работают в наших радиоприемниках, телевизорах и магнитофонах. С ними мы встречаемся на вокзалах и в метро, в троллейбусах и автобусах, громкоговоритель предостерегает нас с крыши орудовской автомашины и встречает нас в магазине.

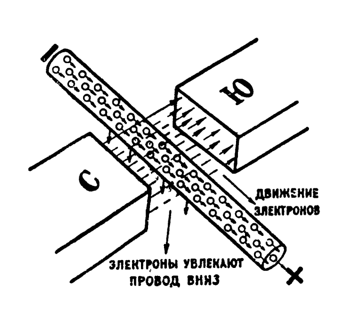
Почему мы сопоставили электродвигатели и громкоговорители? Да просто потому, что их действие основано на одном принципе. Конечно, крошечный электродинамический громкоговоритель из карманного радиоприемника совсем не похож на мощный двигатель, мчащий троллейбус или поезд метро, но тем не менее они являются самыми близкими родственниками.

Как работает электродинамический громкоговоритель?

Звуковая катушка динамика представляет собой некоторое количество витков провода, скрепленных с каркасом катушки и находящихся в сильном магнитном поле. Когда через обмотку катушки не протекает электрический ток, она не испытывает действия каких-либо сил, стремящихся привести ее в движение. Между магнитным полем и звуковой катушкой отсутствуют взаимодействия, могущие вывести ее из положения равновесия.

Но вот в витках звуковой катушки появляется электрический ток: свободные электроны, находящиеся в металле провода катушки, начали организованно двигаться в одну сторону.

Между движущимся электроном и магнитным полем существует определенное взаимодействие. Если электрон движется не точно в направлении поля, то на него будет действовать сила, стремящаяся изменить направление его движения. Направление действия этой силы легко определить по правилу правой руки: если правую руку расположить в магнитном поле так, чтобы ладонь была обращена к северному полюсу, а четыре сложенных пальца указывали направление движения электрона, то отогнутый большой палец укажет направление силы.



Электроны, начав свое движение в проводе звуковой катушки громкоговорителя, немедленно испытывают действие магнитного поля, стремящегося вытолкнуть их из магнитного зазора, и, подчиняясь ему, изменяют направление движения. Если электроны были бы действительно полностью свободными, то они вырвались бы из провода и устремились вон из магнитного зазора громкоговорителя. Началась бы своеобразная «магнитная эмиссия» электронов из провода с током.

Но свобода электронов в проводе относительна. Особенно большие затруднения встречают электроны у поверхности провода. Движение электрона, стремящегося покинуть провод, в этой зоне встречает сильнейшее противодействие со стороны других электронов и ионов металла. Вспомним, что атомы проводников представляют собой положительные ионы — они лишены по меньшей мере одного электрона, ставшего «свободным». Когда такой электрон находится во внутренних объемах проводника, его взаимодействие с ионами и свободными электронами уравновешивается. И ионы и электроны окружают его в равном количестве со всех сторон.

Не то в тонкой пограничной зоне, толщина которой около 10^{-7} *мм*. Ведь ядро каждого атома окружено электронными оболочками. Поэтому самый крайний, самый внешний слой каждого вещества состоит из электронов. Отталкивающее действие этого граничного слоя электронов на приблизившийся к нему свободный элек-

трон ничем не уравновешивается изнутри проводника, наоборот, положительные ионы притягивают его к себе. Электрону, не имеющему очень большой скорости, не преодолеть этот пограничный барьер (вспомним, что в лампе для его преодоления приходится разогревать металл, чтобы придать электронам нужную скорость).

Таким образом, электроны, которые в силу взаимодействия с магнитным полем «хотят» покинуть провод, не могут сделать этого из-за действия сил, существующих в пограничной зоне у поверхности проводника.

Но электроны не могут не подчиняться действию выталкивающей силы магнитного поля. Они начинают двигаться в направлении этой силы и, не будучи в состоянии вырваться из провода, увлекают его с собой.

По такой же точно причине работают все электродвигатели, рамки измерительных приборов и пр. Ротор мотора мощного электровоза, как и звуковую катушку громкоговорителя, движут электроны, которые, повинуясь магнитному полю, стремятся вырваться из провода, но, не будучи в состоянии сделать это, увлекают за собой провод.

В заключение надо сделать маленькую оговорку. Из нарисованной здесь картины можно сделать вывод, что при отсутствии тока электроны в проводе не движутся. Это, конечно, неверно. При отсутствии тока в проводе происходит тепловое движение электронов и эти электроны также взаимодействуют с магнитным полем. Но в тепловом движении электронов нет какого-либо преимущественного направления. Отдельные электроны движутся в различные стороны и, взаимодействуя с магнитным полем, стремятся увлечь с собой провод и вытолкнуть его из зазора в обоих направлениях: и в сторону диффузора и в противоположную сторону. Такие силы взаимно уравновешиваются, поэтому провод остается неподвижным. Лишь при организованном движении больших масс электронов в одном направлении, каким является электрический ток, возникают силы, увлекающие провод в определенную сторону.



От чего зависит мощность громкоговорителя? Какими особенностями конструкции она определяется?

Для получения ответа на эти вопросы как будто проще всего обратиться к таблицам с данными громкоговорителей. Из сопоставления данных, относящихся к громкоговорителям различной мощности, можно будет сразу увидеть, чем они различаются.

Читатель может проделать это. Однако ознакомление с соответствующими таблицами заставит его прийти к странному выводу, что никакой существенной разницы в конструкции громкоговорителей самой различной мощности усмотреть нельзя.

Вот, например, данные двух динамических громкоговорителей: абонентского трансляционного громкоговорителя ДГМ и мощного рупорного «уличного» громкоговорителя Р-10:

Громкоговорители	ДГМ	Р-10
Диаметр диффузора, *мм*	196	170
» звуковой катушки, *мм*	25,4	25,7
Число витков звуковой катушки	41	39
Диаметр провода звуковой катушки, *мм*	0,23	0,21
Магнитная индукция в зазоре, *гс*	5 000	4 800

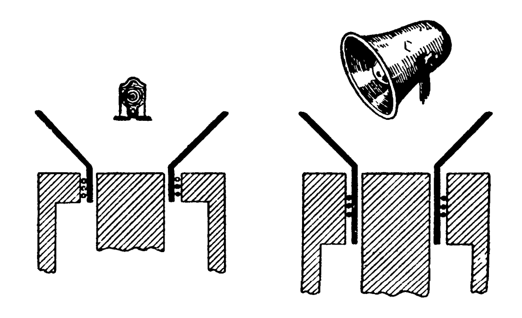
Как видим, размеры звуковых катушек обоих громкоговорителей почти одинаковы; магнитную индукцию тоже можно считать одинаковой, разница в размерах диффузоров очень мала, а по мощности они отличаются друг от друга в... 65 раз. Мощность громкоговорителя Р-10 10 *вт*, а ДГМ — всего 0,15 *вт*.

В чем же дело? Ведь не может же быть, чтобы громкоговорители столь различной мощности не имели кон-

структивных различий. Если звуковая катушка, индукция в зазоре и размеры диффузора у громкоговорителя мощностью 0,15 *вт* такие же, как у 10-ваттного, то что же нам мешает подвести к нему 10 *вт* и заставить его обслуживать большой зал или даже площадь?

Конечно, было бы бесполезно заставлять громкоговоритель ДГМ обслуживать аудиторию на открытом воздухе и перекрывать уличный шум. У него есть конструктивные отличия от его мощного собрата Р-10, но эти особенности не находят отражения в таблицах.

Звуковая катушка громкоговорителя Р-10 может совершать колебания с гораздо большей амплитудой, чем катушка ДГМ. Для того чтобы при больших амплиту-



дах не возникали искажения, надо обеспечить, во-первых, соответствующую конструкцию диффузора (возможность больших смещений без перекоса) и, во-вторых, постоянство магнитного поля на всем пути звуковой катушки. Надо, чтобы катушка при больших колебаниях не выходила из поля. Это второе требование вызывает необходимость значительного увеличения глубины кольцевого зазора, в котором движется катушка, т. е. увеличения толщины верхнего фланца магнитной системы.

Но для того чтобы в глубоком зазоре создать такое же магнитное поле, такую же магнитную индукцию, как в очень малом по глубине зазоре маломощного громкоговорителя, нужен значительно более мощный магнит. Поэтому, несмотря на то, что у обоих рассматриваемых громкоговорителей магнитная индукция в зазоре одинакова, вес их магнитов далеко не одинаков. Магнит гром-

коговорителя Р-10 весит 1 350 *г*, а магнит ДГМ — всего 250 *г*.

Однако вес магнитов и глубину зазора в справочных таблицах не указывают, а остальные данные обычно не дают возможности судить о мощности динамических громкоговорителей.



Громкость звука зависит от того, насколько велика амплитуда колебаний частичек воздуха, оказывающих давление на барабанную перепонку уха. Первые слуховые радиоприборы — телефонные наушники — отличались очень высокой чувствительностью. Благодаря тому, что между мембраной и барабанной перепонкой уха образовывалась маленькая замкнутая область, потерь было мало и даже ничтожной мощности оказывалось достаточно для того, чтобы звуки были отчетливо слышны.

Но если телефон не прижимать плотно к уху, а отнести его на некоторое расстояние, то звуки становятся уже еле слышными. Энергия колеблющейся мембраны распределяется в большой массе воздуха, и ухо воспринимает лишь ее малую долю.

Стремление избавиться от наушников на голове и слушать радиопередачи «невооруженным» ухом заставило радиолюбителей искать способы сделать телефон «громкоговорящим». Прежде всего их внимание привлек к себе рупор, который уже давно применялся для подобных целей. На судах спокон века рупор служил для передачи голосом команд на сравнительно большое расстояние, так как он направлял звух довольно узким пучком. В граммофоне рупор тоже уже много лет исправно служил для громкого воспроизведения звуков, записанных на граммофонную пластинку.



Другой принцип повышения громкости — создание колебаний больших масс воздуха за счет увеличения размеров мембраны, которую в этом случае принято называть диффузором. Легкий бумажный диффузор диаметром 20—30 *см* приводился в движение с помощью железного якорька, вибрирующего со звуковой частотой между полюсами магнита; диффузор заставлял колебаться с такой же частотой частички воздуха в большом объеме, в результате чего резко повышалась громкость звучания. Громкоговорителем такого типа был «Рекорд», который в течение более трех десятилетий исправно обслуживал миллионы радиослушателей.

Однако такой громкоговоритель принципиально не может не вносить некоторых искажений. Несравненно лучше ведут себя электродинамические громкоговорители, у которых диффузор приводится в движение посредством катушки, колеблющейся в поле сильного постоянного магнита (см. стр. 103). Этот тип громкоговорителей наиболее широко применяется до настоящего времени.

В последние годы получил распространение еще один тип диффузорного громкоговорителя — конденсаторный. У этого громкоговорителя роль диффузора выполняет лист тончайшей металлической фольги, который служит одной обкладкой конденсатора. Вторая обкладка — массивная, неподвижная. Между обкладками приложено большое постоянное напряжение, под действием которого легкая подвижная обкладка натягивается в направлении к неподвижной. На это постояннное напряжение накладываются электрические колебания звуковой частоты, которые изменяют электрическое поле между пластинами с такой же частотой, и благодаря этому меняется натяжение подвижной обкладки, которая колеблется в такт с звуковой частотой. В результате эта обкладка выполняет роль диффузора.

Конденсаторный громкоговоритель хорошо воспроизводит самые различные частоты звукового спектра.

В современных высококачественных звуковоспроизводящих агрегатах этот тип громкоговорителя используется довольно широко.

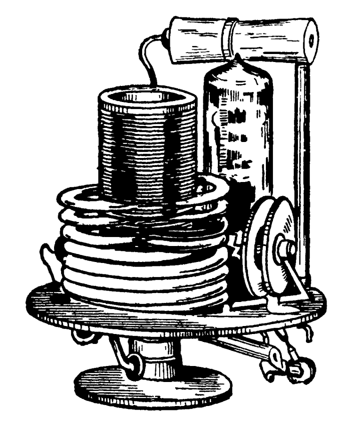
Качество звучания всех диффузорных громкоговорителей в очень значительной степени зависит от свойств подвижной системы и в первую очередь от конструкции и способа крепления диффузора, который имеет решающее значение для громкоговорителя.

Но вот совсем недавно появился громкоговоритель без мембраны и вообще без видимых движущихся деталей. Однако так или иначе воздух нужно заставить колебаться, иначе ничего не услышим. В новом громкоговорителе, названном ионофоном, эту задачу выполняет не механическая деталь — диффузор, а электрическое поле. Это поле создается ламповым генератором колебаний высокой частоты (порядка 30 *Мгц*). Специальный высокочастотный трансформатор повышает напряжение этих колебаний до 10—20 *кв* и подводит его к электроду в виде стержня, помещенного в трубку из тугоплавкого кварцевого стекла. Снаружи находится второй электрод, который может иметь форму кольца. Таким образом, между двумя электродами создается сильное электрическое поле, под действием которого возникает процесс, знакомый большинству из нас еще со школьных лет. Помните, как с заостренного медного стержня извергаются молнии, создаваемые школьной электрической машиной? Благодаря этому опыту мы на всю жизнь запоминаем, что острие способствует стеканию электрических зарядов.

Если электрическое поле вокруг острия недостаточно сильно для того, чтобы вызвать электрический пробой— искру, то возникает так называемый коронирующий разряд или корона вокруг острия. В ионофоне корона возникает на конце внутреннего стержня и при этом частички окружающего воздуха ионизируются. Вокруг конца иглы возникает как бы облачко ионов. Величина этого облачка зависит от величины подведенного от генератора напряжения.

Если теперь осуществить в высокочастотном генераторе модуляцию звуковой частотой подобно тому, как это делается в любом передатчике, то амплитуда высокочастотного напряжения будет изменяться в такт с модуляцией, а следовательно, таким же образом будет

пульсировать и ионное облачко. Изменения объема облачка вызовут в свою очередь изменения давления окружающего воздуха, т. е. будут созданы звуковые колебания. Остается теперь наилучшим образом использовать эти колебания. С этой целью их подводят к рупору, откуда уже и излучаются звуковые колебания в окружающее пространство.



Такой громкоговоритель, в котором совершенно нет движущихся механических частей, способен воспроизводить без искажений колебания самых высоких звуковых частот: до 20 *кгц* и даже еще выше — ультразвуковые.

ПОЧЕМУ в комнате слышно громче, ЧЕМ НА ОТКРЫТОМ ВОЗДУХЕ

У Вас есть хороший радиоприемник. Он наполняет комнату чистыми приятными звуками при едва наполовину выведенном регуляторе громкости. Выезжая летом на дачу, Вы решили взять радиоприемник с собой — трудно расстаться со своим верным другом. Вы предвкушаете, как хорошо будет послушать радиопередачу на открытом воздухе, среди цветов и зелени.

Но что случилось с радиоприемником? Его установили на столике в саду, протянули достаточно высокую антенну, конечно лучшую, чем городская комнатная антенна, но проиемник работает очень тихо, даже при полностью выведенном регуляторе громкости. Проверка напряжения и ламп ничего не дала: напряжение нор-

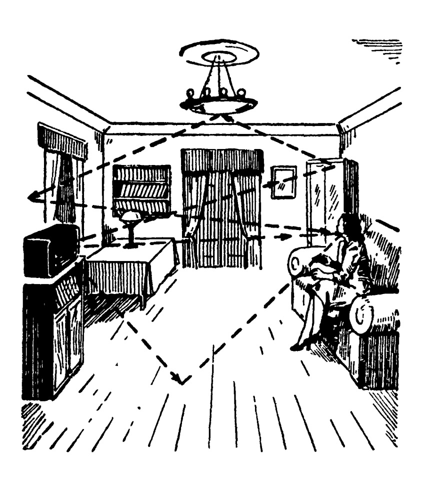
мальное, лампы хорошие. Больше того, здесь же, на даче, в комнате приемник работает по-прежнему громко, но как только его выносят на открытый воздух, его громкость резко уменьшается.

В чем же дело? Ведь не может быть, чтобы в комнате приемник развивал бо́льшую мощность, чем при работе в саду?

Разумеется, приемник и в комнате и на открытом воздухе работает одинаково, отдаваемая им мощность и развиваемая громкость тоже одинаковы, но слышно в комнате действительно громче, чем на открытом воздухе. Объясняется это очень просто.

На открытом воздухе звуковая волна, рождаемая громкоговорителем приемника, долетает до нас и уносится дальше. Мы, так сказать, слышим каждый звук громкоговорителя только раз. Не так обстоит дело в комнате.

Конечно, и в комнате мы прежде всего слышим звуковую волну, достигшую наших ушей непосредственно от приемника. Но слышим мы не только ее одну. Созданные приемником звуковые волны достигают стен комнаты, предметов обстановки и т. п. и отражаются от них под самыми различными углами. Часть отраженных волн попадает в наши уши и их действие складывается с действием основной волны. Но и на этом дело не заканчивается. Отраженные от стен звуковые волны снова ударяются о стены, вновь отражаются от них и опять достигают наших ушей, складываясь с волнами, достигшими их раньше.



Разумеется, энергия звуковых волн с каждым отражением уменьшается — звуковые волны затухают. Общее число отражений звуковых волн в комнате достигает нескольких сотен, но на увеличении громкости слу-

хового восприятия сказываются обычно первые пять — десять отражений, после чего мощность отраженных волн становится столь малой, что они уже не могут существенно повлиять на суммарную интенсивность слухового ощущения.

Повторные воздействия звуковых волн на органы слуха приводят к известному удлинению каждого звука, но оно слишком мало, чтобы исказить звучание. В этом легко убедиться. Расстояния, которые проходит в обычной комнате звуковая волна при своем отражении, не превосходят 5—6 *м*. При скорости 340 *м* в секунду звук проходит такое расстояние примерно за 0,02 *сек*. Следовательно, первые наиболее громкие отраженные звуки воспринимаются в течение около 0,1 *сек*. Удлинения звука на одну десятую секунды мы не замечаем.

Может ли в комнате произойти то, что акустики называют отрывом отраженного звука от основного? Нет, не может. Для того чтобы мы услышали два звука раздельно, интервал между ними должен составлять не менее $^1/_{16}$ *сек*. За $^1/_{16}$ *сек* звук проходит расстояние 50 *м*, следовательно, громкое эхо — эхо первого отражения — может получиться в комнате с расстоянием между стенами не менее 25 *м*, но таких жилых комнат не бывает.

Из этого примера, между прочим, ясно видна разница между эхом и реверберацией. Под реверберацией понимается увеличение громкости звучания и его длительности, но без отрыва отраженных звуков от основного. Если же происходит отрыв отраженного звука от основного и мы различаем их раздельно, то возникает эхо.

Увеличение громкости звучания в помещении по сравнению с громкостью звучания на открытом воздухе наблюдается не только при работе радиоприемников. Слова оратора, пение, игра на музыкальных инструментах и т. п. в помещениях слышны громче, чем вне их. На открытом воздухе ораторам приходится значительно напрягать голос, иначе их будет слышно плохо.

В заключение интересно задать вопрос: куда же все-таки в конце концов девается звук? Ведь звуковые волны несут с собой известную энергию, которая не может пропасть бесследно.

Энергия звуковых волн, заключающаяся в механическом колебании частиц воздуха, в конце концов превра-

щается в тепло. Звук в комнате затухает вследствие того, что энергия звуковых волн затрачивается на преодоление трения между частицами воздуха и нагревание стен и всех предметов обстановки. Но это нагревание так мало, что обнаружить его мы конечно не можем. В очерке о к. п. д. радиоприемника (см. стр. 124) приводится пример крайне малой мощности звуковых колебаний, создаваемых громкоговорителем радиоприемника. Мы бы не заметили повышения температуры в комнате, даже если бы звуковая энергия, развиваемая радиоприемником в течение года, выделилась сразу.



Сочетание «беззвучный громкоговоритель» кажется нелепым. Но...

Вы вошли в больничную палату. Полная тишина. Около десятка больных лежит на кроватях. Двое спят, один читает. Остальные лежат в разных позах. Вдруг они, словно по команде, сначала заулыбались, потом расхохотались.

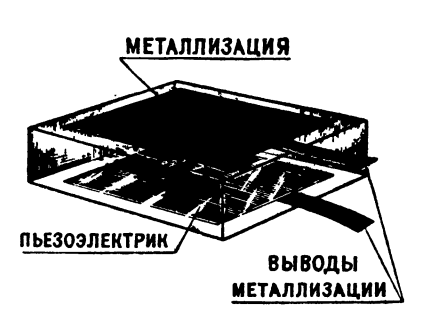
Сопровождающий Вас врач усмехнулся, заметив Ваш недоуменный взгляд, и сказал:

— Это радио. Они лежат на говорящих подушках.

Присмотревшись, Вы замечаете, что близ изголовья каждой кровати установлена штепсельная розетка, от которой тянется провод под подушку. По Вашей просьбе врач показал механизм этой странной «говорящей подушки». Провод, идущий от штепсельной розетки, соединенной с трансляционной сетью, заканчивается плоским футлярчиком из целлулоида длиной с мизинец, шириной около 1 *см* и толщиной не более 3 *мм*.

Пока он не соприкасается с твердыми предметами, он не издает никаких звуков. Но если приложить его к какому-нибудь предмету — столу, коробке, газетному листу, то он начинет звучать, как громкоговоритель.

В этом целлулоидном футлярчике находится пьезоэлемент. Под воздействием тока звуковой частоты, поступающего из трансляционной сети, пьезоэлемент вместе с гибким футлярчиком изгибается с частотой, равной частоте тока, и колеблет как мембрану предмет, к которому от прижат. Таким образом рождаются звуки.



Подушка слишком мягка, для того чтобы сыграть роль мембраны и начать звучать, но она достаточно хорошо передает вибрации пьезоэлемента покоящейся на ней голове и дает возможность воспринимать звуки не ушами, а любой частью поверхности головы. Поэтому для слушания радиопередачи совсем не обязательно прикладывать к подушке ухо. Голова может располагаться на подушке, как угодно. Радиопередача все равно будет слышна.

Но она слышна только тому, чья голова лежит на подушке. Сама подушка не звучит, поэтому никто из находящихся в комнате ничего не услышит.

Такие «беззвучные громкоговорители» очень удобны в больничных палатах, общежитиях, домах отдыха и пр. Одни из находящихся в комнате хотят слушать радиопередачу, другие не хотят. Как тут быть? Громкоговоритель включить нельзя. Пользоваться телефонными наушниками утомительно: они сжимают уши и голову, вынуждают сохранять определенное положение головы.

«Беззвучный пьезоговоритель» лишен этих недостатков. Он позволяет слушать радиопередачи, никому не мешая, не стесняя голову наушниками и не вынуждая ее принимать определенное положение.

Заделка пьезоэлемента в плотно охватывающей его целлулоидный футлярчик нужна для защиты от повреждений. Сами по себе пьезоэлементы хрупки и без такой защиты быстро приходили бы в негодность.



ЭТО НЕ МОЙ ГОЛОС

Вы в первый раз в жизни произвели запись своего голоса на магнитофоне. С интересом переключаете его на воспроизведение и... разочаровываетесь: из громкоговорителя звучит не Ваш, а какой-то чужой, незнакомый голос.

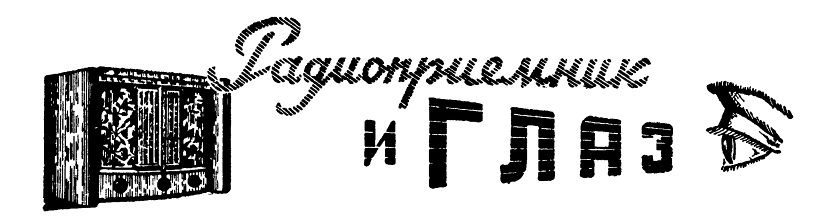
Но почему-то окружающие не уловили искажения, они утверждают, что голос очень похож. Чем же объясняется это разногласие? Почему все узнают Ваш голос, а Вы сами не узнаете?

Все звуки, доходящие до нас извне, мы воспринимаем ушами, но звуки собственного голоса мы улавливаем не ушами, а костями черепа. Вибрации голосовых связок непосредственно передаются костям и через них слуховому нерву. Но при передаче по костям звук приобретает не ту окраску, что при передаче по воздуху. Мы привыкли к такому тембру своего голоса, какой характерен при передаче по костям, поэтому мы не узнали его, когда нам пришлось воспринять его «с воздуха». Все же окружающие, естественно, привыкли к «воздушному» тембру вашего голоса и поэтому сразу узнают его в магнитофонной записи.

Конечно, когда мы говорим или поем, наши уши тоже воспринимают звуки из воздуха, но раздражение, дошедшее до слухового нерва по костям, значительно сильнее раздражения, созданного колебаниями барабанной перепонки, и основная тембровая окраска голоса определяется «костяным трактом». В этом легко убедиться. Попробуйте говорить что-нибудь с одинаковой громкостью и слушать себя сначала, как обычно, а потом, закрыв уши. Вы убедитесь, что, за-



крыв уши, Вы услышите себя гораздо громче. Закрыв уши, Вы исключили воздействие на слуховой нерв всех посторонних шумов, оказывающих маскирующее действие на звук Вашего голоса, поэтому он стал слышен относительно громче. Чем больше шум в помещении, тем резче будет разница.



Радиоприемник представляет собой аппарат, предназначенный для приема радиоволн. Наш глаз является оптическим прибором, назначение которого состоит в приеме световых волн.

Но ведь физическая сущность радиоволн и световых волн одинакова: и те и другие относятся к электромагнитным колебаниям и различаются лишь частотой. Радиоволнами мы считаем в настоящее время электромагнитные колебания с длиной волны примерно от нескольких миллиметров до нескольких километров, а световые волны имеют длину волны 0,36—0,76 *мк*, т. е. 0,00036—0,00076 *мм*.

Поскольку с этой точки зрения радиоприемник и глаз можно считать приборами одинакового назначения, мы можем сравнить их технические качества. Наиболее легко сравнимым показателем приемника и глаза является их чувствительность.

Чувствительность человеческого глаза определена очень точно. Как известно, чувствительность глаза зависит от общей освещенности. Днем, на солнечном свету, мы не видим, например, огонька горящей папиросы, а безлунной ночью его можно различить за полкилометра. Наибольшую остроту наше зрение приобретает после пребывания в темноте не менее 20—30 *мин*. Эта степень

остроты называется сумеречным зрением. Если нам случится войти в кинотеатр во время сеанса, то мы чувствуем себя совершенно беспомощными и вынуждены передвигаться ощупью, поминутно натыкаясь на стулья и зрителей. Но через некоторое время мы уже без труда различаем даже мелкие предметы и свободно читаем, например, газетные заголовки.

Достигнув остроты сумеречного зрения, наш глаз реагирует на освещенность зрачка порядка 10^{-6} люкса. Если такую освещенность выразить в электрических единицах, то получается, что она соответствует электромагнитному полю интенсивностью около $1{,}5 \cdot 10^{-12}$ *вт/м*^{2}.

Какова же чувствительность радиоприемника? По стандарту чувствительность приемников 1-го класса должна быть не меньше 50 *мкв*. Учитывая действующую высоту средней приемной радиовещательной антенны, будем считать, что такая э. д. с. подводится к приемнику при напряженности в месте приема электромагнитного поля принимаемой станции порядка 10 *мкв/м*. Удельная энергия такого поля равна $1{,}3 \cdot 10^{-13}$ *вт*.

Таким образом, радиовещательный приемник 1-го класса примерно в 10 раз чувствительнее глаза. Но надо отдать должное глазу и отметить, что для того чтобы приемник мог опередить глаз в отношении чувствительности, в приемнике приходится применять около десятка современных усилительных ламп, дающих общее усиление в миллионы раз.

Чувствительность профессиональных приемников выше чувствительности радиовещательных в десятки и даже сотни раз.

Но, уступая приемнику в чувствительности, глаз неизмеримо превосходит его в отношении «принимаемого» диапазона частот. Глаз воспринимает частоты $4 \cdot 10^{14}$—$8 \cdot 10^{14}$ *гц*, т. е. воспринимает огромную полосу $4 \cdot 10^{14}$ *гц* (400 квадрильонов герц), тогда как вся полоса частот, используемая радиотехникой, охватывает частоты примерно 10^5—$3 \cdot 10^{10}$ *гц*, т. е. полосу, в миллиарды раз меньшую.

Наш глаз — исключительно широкополосный прибор.



Радиоприемник усиливает напряжение подводимых к его входу сигналов в огромное число раз. При приеме отдаленных станций напряжение на входе приемника составляет несколько десятков микровольт, а в анодной цепи его оконечной лампы развивается при таком сигнале переменное напряжение порядка 100 *в,* что соответствует усилению примерно в 2 млн. раз.

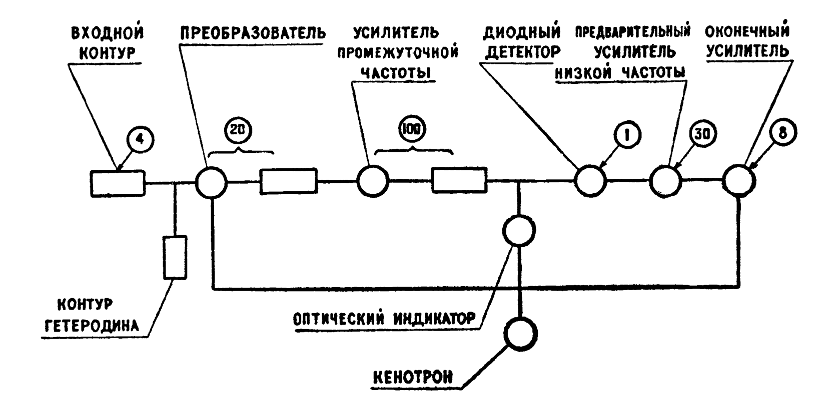
Какими же элементами приемника осуществляется это усиление?

Для усиления в приемнике используются электронные лампы (или транзисторы), в которых усиление подводимого напряжения и создание усиленной мощности происходят за счет энергии батареи, и колебательные контуры, в которых напряжение сигнала повышается благодаря их резонансным свойствам.

Но не все лампы и контуры приемника наиболее распространенного теперь супергетеродинного типа участвуют в усилении сигналов. Кенотрон и оптический индикатор настройки не принимают участия в усилении. Это же можно сказать и о диодной детекторной лампе, контурах гетеродина и гетеродинной лампе, если ее функции в приемнике выполняет отдельная лампа.

Но и принимающие участие в усилении детали приемника вносят свой пай в общее усиление далеко не в равной степени. Мало усиливает каскад с преобразовательной лампой, еще меньше — с оконечной. Наибольшее усиление дает усилитель промежуточной частоты.

Примерно распределение усиления показано на рисунке, где кружками изображены лампы, а квадратиками — колебательные контуры. По типу этот приемник является супергетеродином 2-го класса. Цифры, стоящие около ламп и контуров, указывают величину усиления. Цифра 1 означает, что данная деталь не принимает



участия в усилении. Из числа имеющихся в приемнике колебательных контуров только входной контур дает усиление по напряжению. В остальных каскадах, имеющих колебательные контуры, усиление получается вследствие совместного действия ламп и контуров.

Два миллиона раз — это далеко не предельное усиление приемника. Но и такое усиление трудно с чем-нибудь сравнить. Ведь лучший микроскоп увеличивает всего в тысячу раз и даже могущественнейший современный электронный микроскоп, позволяющий разглядеть крупные молекулы, увеличивает примерно в 100 000 раз.

Шумы — внешние и внутренние — являются настоящим «бичом» радиоприема. Они кладут фактический предел чувствительности радиоприемников.

Ну а каких же величин чувствительности все же удается достигнуть в приемниках?

Чувствительность, предусматриваемая Государственным стандартом для радиовещательных приемников 1-го класса, составляет 50 *мкв*. Фактическая чувствительность этих приемников бывает несколько выше и колеблется в пределах примерно 20—50 *мкв*. Лучшие профессиональные приемники имеют чувствительность порядка 1—10 *мкв*.

Наивысшей чувствительностью обладают приемники, применяемые для радиолокации небесных тел и для связи с космическими кораблями. Их чувствительность измеряется долями микровольта.

Исключительной чувствительностью обладают приемники радиотелескопов. Они способны принимать сигналы с удельной энергией 10^{-17} *вт/м²*. Такую удельную энергию создала бы в Москве лампочка от карманного фонаря, горящая во Владивостоке.

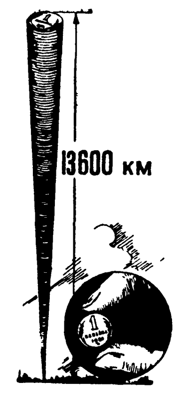


Усиление в 2 млн. раз нормально для среднего приемника (см. стр. 119). Но ведь приемники в конце концов созданы не для того, чтобы уисиливать напряжение. Мы оцениваем приемники не по напряжению на выходе, а по выходной мощности. Нас интересует, какую мощность звуковой частоты отдает приемник.

В результате воздействия на антенну радиоволн принимаемой станции приемник получает от антенны определенную мощность, которая затрачивается на создание на входном сопротивлении приемника некоторого напряжения. Если приемник не получал бы от антенны никакой мощности, то на его входном контуре не возникало бы напряжение.

Средняя радиослушательская антенна, в том случае когда в ней действует э. д. с. 100 *мкв*, может передать приемнику в самом лучшем случае не больше 10^{-10} *вт*. Приемники 2-го класса имеют выходную мощность не менее 1,5 *вт*. Таким образом, мощность 10^{-10} *вт*, поступившая из антенны в приемник, усиливается им до 1,5 *вт*, т. е. в 15 млрд. ($15 \cdot 10^9$) раз.

Усиление приемника по напряжению измеряемое миллионами, бледнеет перед этой огромной цифрой. Что такое 15 миллиардов? Возьмем копейку — маленькую металлическую монетку достоинством в 1 коп. Она весит ровно 1 *г*. 15 миллиардов таких копеек составят сумму 150 млн. руб. и будут весить 15 000 *т*. Наша автопро-



мышленность выпускает сверхмощные грузовики грузоподъемностью 25 *т*—знаменитые минские самосвалы. Для перевозки 15 млрд. коп. потребуется колонна из 600 таких грузовиков. На 9 *км* растянется по шоссе эта колонна. Если 15 млрд. коп. положить друг на друга, то получится «столбик» высотой 13 600 *км*.

Вот что значит 15 миллиардов. На такое колоссальное усиление мощности способен наш скромный радиоприемник за счет, разумеется, той энергии, которую он черпает из источников питания. Более мощные приемники при приеме станций, создающих поле меньшей напряженности, дают усиления, еще в десятки и сотни раз бóльшие. Трудно найти подходящее сравнение для таких усилений.



Радиоприемник 2-го класса вроде, например, «Балтики» потребляет от осветительной сети около 70 *вт*. В сравнении с большинством других распространенных электроприборов — плиток, чайников, утюгов, холодильников — эта энергия невелика. Только разве паяльники да небольшие лампы потребляют меньше.

А хватит ли силы у человека питать такой приемник?

Установлено, что человек при сравнительно длительной работе способен развить мощность около одной де-

сятой лошадиной силы. Так как 1 *л. с.* в переводе в электрические единицы равна 736 *вт*, то выходит, что человек может в нормальных условиях развить мощность около 75 *вт* — столько, сколько надо для питания приемника.

В научно-популярной литературе можно найти сопоставление того количества энергии, какое теряет в виде тепла стакан остывающего чая, с той работой, которую это количество энергии может произвести. Подобное сопоставление приводит обычно к неожиданным результатам.

Действительно, один стакан чая емкостью 200 $см^3$ (0,2 *л*), остывая от 100 до 20° С (до комнатной температуры), т. е. на 80° С, теряет

$$0{,}2 \cdot 80 = 16 \textit{ ккал.}$$

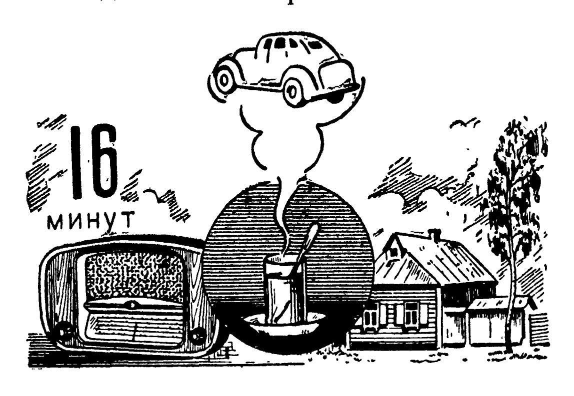
Так как килокалория эквивалентна 427 *кГ·м*, то 16 *ккал* могут совершить работу, равную:

$$16 \cdot 427 = 6\,832 \textit{ кГ·м.}$$

Результат поражающий. Широко распространенный у нас автомобиль «Москвич» весит 1 030 *кг*. Будем считать, что вместе с четырьмя пассажирами он весит 1 300 *кг*. Значит, за счет энергии остывающего стакана чая автомобиль «Москвич» вместе с четырьмя взрослыми пассажирами можно поднять на высоту

$$6\,832 : 1\,300 = 5{,}2 \textit{ м,}$$

т. е. на крышу одноэтажного дома. Неудивительно, что пример этого рода в одной из книг Я. Перельмана озаглавлен «Невидимый богатырь в стакане чая».



Однако посмотрим, как долго этот «богатырь» сможет питать приемник «Байкал».

1 *кГ·м* эквивалентен $2{,}72 \cdot 10^{-3}$ *вт·ч* $= 2{,}72 \cdot 60 = 163{,}2 \cdot 10^{-3}$ *вт·мин*. Следовательно, 6,832 *кГ·м* дадут:

$$163{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 6\,832 = 1\,115 \text{ вт·мин.}$$

Так как мощность, потребляемая «Байкалом», равна 70 *вт*, то

$$1\,115 : 70 = 16 \text{ мин.}$$

«Богатырь», могущий зашвырнуть «Москвича» с седоками на крышу дома, сможет питать приемник в течение всего лишь 16 *мин*, после чего его сила, порожденная стаканом остывшего чая, совершенно иссякнет.

Мощность, потребляемая радиоприемниками, исчисляется обыкновенно десятками ватт. Эта мощность по величине ближе всего к мощности, потребляемой электроосветительными лампами. Мы чаще всего пользуемся лампами мощностью от 10—15 до 100 *вт*. Такова же и мощность радиоприемников.

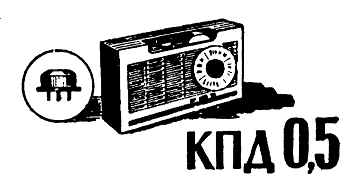
Однако лампа, как известно, настоящий растратчик электроэнергии. Ее к. п. д. доходит только до 6%. Лишь 6% потребляемой энергии лампа преобразует в свет, а остальные 94% она бесцельно рассеивает в виде тепла.

Каковы в этом отношении радиоприемники?

Они далеко уступают электролампам. Это легко увидеть из простого сопоставления известных всем цифр. Радиоприемник, потребляющий примерно 50 *вт*, имеет выходную мощность около 2 *вт*, т. е. его к. п. д. $\approx 4\%$. Это в 1,5 раза меньше, чем у электролампы. Но эта цифра не окончательная. Радиоприемник отдает 2 *вт* электрической мощности, которая подводится к громкоговорителю. А к. п. д. громкоговорителя всего около 1%. Таким образом, у нашего приемника отдаваемая звуковая мощность, которую мы и используем, достигает всего 0,02 *вт*, а к. п. д. приемника составляет всего-навсего 0,04.

Четыре сотые доли потребляемой энергии сетевой радиоприемник превращает в полезную продукцию — в звук, а все

остальное обращается на нагревание комнаты.



Самые экономичные радиоприемники — транзисторные. Их к. п. д. по электрической мощности доходит до 50%. Но, к сожалению, это высокое техническое достижение «портит» громкоговоритель со своим 1-процентным к. п. д. В результате к. п. д. транзисторного приемника «по звуку» получается всего лишь около 0,5%. Конечно, для радиоприемника это очень хороший к. п. д., но для электроустройства вообще он позорно мал.





Выходная мощность радиовещательных приемников колеблется в пределах от 0,15 *вт* у самых простых батарейных до 4—5 *вт* у сетевых приемников 1-го класса. А какая же мощность в действительности нужна для того, чтобы радиопередача была громко слышна в жилых комнатах обычных размеров?

Громкость — понятие довольно условное и зависящее от индивидуальных вкусов. Одни любят слушать так, чтобы громкость была только-только достаточной для полной разборчивости при условии соблюдения в комнате тишины, другие не признают приема, иначе как при полностью выведенном регуляторе громкости.

Наиболее полно обследован вопрос о величине электрической звуковой мощности, нужной для хорошего озвучения помещений разной кубатуры, в звуковом кино. Но, естественно, все справочные данные в этой области всегда относятся к большим помещениям и выражаются в ваттах на кубический метр объема зала. Если пересчитать эти данные применительно к размерам, какие имеют обычные жилые комнаты, и отнести их для лучшей наглядности не к объему, а к площади (считая, что в среднем высота комнаты равна 3,5 *м*), то получится следующая таблица.

Площадь комнаты, $м^2$	Мощность, подводимая к громкоговорителю, *вт*	Площадь комнаты, $м^2$	Мощность, подводимая к громкоговорителю, *вт*
5	0,15	20	0,5
10	0,3	25	0,6
15	0,4	30	0,7

Громкость, соответствующая приведенным в этой таблице величинам мощности велика. Чтобы разговаривать, когда приемник работает с такой громкостью, придется повышать голос.

Для сравнения можно указать, что звуковая мощность, развиваемая обычным громмофоном при проигрывании пластинки средней громкости, составляет в пересчете на ватты около 0,2 *вт*. Надо подвести к громкоговорителю 0,2 *вт*, чтобы получить такую же громкость, какую развивает граммофон. Мощность человеческого голоса при разговоре с нормальной громкостью в таком же пересчете составляет около 0,001 *вт*.

Эти цифры показывают, насколько велик у всех наших радиоприемников «запас» мощности. Уже мощность приемников 3—4-го классов вполне достаточна для самых больших жилых комнат.

Запас мощности нужен для естественности звучания. Нормальная средняя нагрузка приемника — треть его мощности. Избыток мощности остается в запасе. Если такого запаса нет, то прием будет искажен.



Существует очень распространенный способ проверки исправности низкочастотной части приемника — прикосновение пальцем к управляющей сетке первой лампы усиления низкой частоты (или к сетке детекторной лампы в приемниках прямого усиления). Если усилитель исправен, то при таком прикосновении из громкоговорителя раздается громкое гудение низкого тона, напоминающее рев.

Этим способом широко пользуются все радиолюбители. При каждой неисправности приемника рука прежде всего автоматически тянется к гнезду входа звукоснимателя. «Заревет» приемник — значит произошло повреждение в высокочастотных каскадах, не «заревет» — значит неисправна низкочастотная часть либо на лампах нет напряжения.

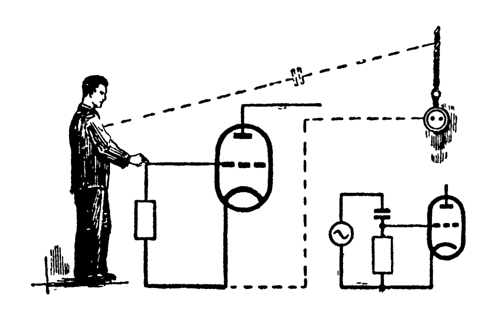
Но не каждый, пользующийся таким способом проверки приемника, отдает себе отчет, почему прикосновение к выводу сетки вызывает гудение. Ведь для того чтобы громкоговоритель воспроизвел какой-то звук, надо, чтобы ко входу усилителя было приложено напряжение соответствующей частоты. Какое же напряжение и какой частоты подводим мы к усилителю, прикасаясь пальцем к его входу?

Возможно, что иные удивятся, узнав, что, прикасаясь пальцем ко входу усилителя, мы тем самым подводим к нему часть напряжения осветительной сети. Между тем это так.

Между нами и осветительной сетью всегда есть некоторая емкость. Она может быть очень невелика, но тем не менее она оказывается достаточной для того, чтобы на сетку попало напряжение, способное после усиления заставить громкоговоритель звучать.

Попробуем подсчитать, какое напряжение окажется на сетке входной лампы усилителя, если емкость человека относительно осветительной сети напряжением 220 *в* составит всего 1 *пф*.

Для переменного тока частотой 50 *гц* конденсатор 1 *пф* представляет сопротивление около $3 \cdot 10^9$ *ом*. Если сопротивление утечки сетки входной лампы равно 1 *Мгом*, то напряжение сети окажется приложенным к делителю, составленному из двух сопротивлений: $3 \cdot 10^9$ и $1 \cdot 10^6$ *ом*. Сетка лампы присоединена ко второму — меньшему плечу этого делителя и на ее долю придутся три десятитысячные напряжения сети, т. е. около 0,07 *в*.



Такого напряжения вполне достаточно, чтобы заставить звучать громкоговоритель. Приемник получает от звукоснимателя напряжение порядка 0,1—0,2 *в*; при этом он отдает свою полную мощность. Поэтому неудивительно, что при подведении примерно лишь вдвое меньшего напряжения звучание получается достаточно громким.

Следует учесть, что обычно значительно бо́льшая емкость, чем между телом и осветительной сетью, создается между телом и силовым трансформатором приемника и всеми токонесущими проводами. В этом случае с выпрямителя наводится еще напряжение второй гармоники переменного тока (100 *гц*), которое усиливается в еще большей степени.

Легко убедиться в том, что именно эта причина вызывает гудение громкоговорителя. Прикосновение ко входу усилителя низкой частоты батарейного приемника на некотором отдалении от осветительной сети не сопровождается привычным нам «ревом».

Таким образом, прикасаясь к сетке лампы усилителя, мы включаемся в его схему, становясь одним плечом потенциометра осветительная сеть — земля.



При помощи трансформаторов можно повышать напряжение переменного тока.

Как использовать наилучшим образом эту способность трансформатора в приемнике? Не может ли использование трансформатора стать одним из путей к созданию безлампового приемника? Продетектировав принятый модулированный сигнал и выделив из него напряжение звуковой частоты, можно, казалось бы, при помощи трансформатора повысить его напряжение во много раз — до такой величины, которая достаточна для работы громкоговорителя.

К сожалению, из этого ничего не получится, так как для работы громкоговорителя нужно не только напряжение, но и определенная мощность, а трансформатор мощности не повышает; наоборот, при передаче ее из первичной цепи во вторичную часть мощности теряется.

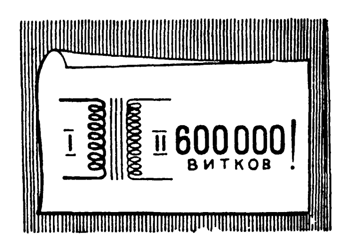
Но это препятствие, казалось бы, можно обойти. Одним из немногих приборов, управление которыми практически производится без затраты мощности, является электронная лампа. Поэтому можно представить себе громкоговорящий приемник всего с одной выходной лампой. Выделенное детектором напряжение повышается при помощи трансформатора и подается дальше на сетку выходной лампы, в анодной цепи которой вследствие этого создается необходимая мощность звуковой частоты.

Если приемник принимает сигналы станции, которая слабо слышна на телефонные наушники, то после детектора получится напряжение звуковой частоты порядка сотых долей вольта. А для работы батарейной выходной лампы требуется подать на ее сетку примерно 4—4,5 *в*. Это значит, что после детектора нужно повысить напряжение примерно в 400—450 раз. Эту задачу при помощи трансформатора, казалось бы, решить весьма просто: намотаем во вторичной обмотке в 400 раз боль-

ше витков, чем в первичной, и получим требуемое напряжение.

На практике, однако, оказывается, что это далеко не так просто. Для того чтобы громкоговоритель звучал хорошо, он должен воспроизводить одинаково равномерно все звуковые частоты, т. е. напряжение всех воспроизводимых частот должно быть усилено одинаково. Для этого первичная обмотка трансформатора должна обладать достаточно большим индуктивным сопротивлением по отношению к наиболее низким частотам. Надо, чтобы это сопротивление было в 2—3 раза больше внутреннего сопротивления детектора. А это значит, что в первичной обмотке должно быть довольно много витков: не десятки и даже не сотни, а тысячи. В противном случае низкие частоты будут усиливаться очень плохо.

Для более или менее равномерного усиления низших звуковых частот (от 80—100 до 200—300 *гц*) при сердечнике средних размеров (сечение 20×20 *мм*) необходимо иметь в первичной обмотке 1 500—2 000 витков. Но тогда во вторичной обмотке потребуется 1 500·400 = = 600 000 витков. Намотать такое число витков практически нельзя. Следовательно, о громкоговорящем приеме слабых станций говорить не приходится.

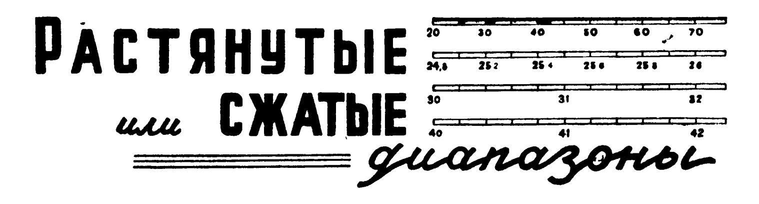


Даже если ограничиться громкоговорящим приемом только хорошо слышимых на телефон станций, создающих на выходе детектора напряжение 0,1—0,2 *в*, то во вторичной обмотке понадобится около 40 000 витков — цифра также мало реальная. Чтобы намотать столько витков на сердечнике средних размеров, потребовался бы очень тонкий провод и изготовление трансформатора было бы сопряжено с большими техническими трудностями.

Реально выполненный трансформатор приемлемых размеров будет иметь так мало витков в первичной обмотке, что его частотная характеристика окажется совершенно неудовлетворительной: низкие частоты будут воспроизводиться очень плохо и усиление будет все более возрастать с повышением частоты. Этому будет спо-

собствовать еще и то обстоятельство, что большая собственная емкость вторичной обмотки вызовет появление резонанса во вторичной цепи в области высших частот. В результате частотная характеристика будет иметь еще более сильный подъем в этой области.

Все это приведет к тому, что высшие частоты будут резко преобладать и передача будет состоять из одних выкриков на высших частотах, которые перекроют все остальные звуки. Если учесть еще и потери во вторичной обмотке, то станет ясно, что, несмотря на кажущуюся простоту большого повышения напряжения при помощи трансформатора, задача эта для диапазона звуковых частот сопряжена со столь большими трудностями, что гораздо проще применить для этой цели одно- или двухламповый усилитель. Этим объясняется то, что в современных приемниках задача усиления низкой частоты именно так и решается.



Одним из усовершенствований, вводимых в современные радиовещательные приемники, являются так называемые «растянутые диапазоны» на коротких волнах. Каждый радиослушатель хорошо знает, как легка настройка при приеме на таких «растянутых» диапазонах: ничуть не труднее, чем на длинных или средних волнах.

Происходит это потому, что путем присоединения параллельно переменному конденсатору и последовательно с ним постоянных конденсаторов резко уменьшается относительная величина перекрытия частот: полный поворот ротора конденсатора изменяет частоту уже не в 3 раза, как на длинных и средних волнах, а всего примерно в 1,1 раза, т. е. лишь на 10%. Такое перекрытие охватывает лишь один из участков, отведенных на коротковолновом диапазоне для радиовещания, например: 25-метровый, 40-метровый и т. п.

Нужно сказать, что прочно привившееся название «растянутый диапазон» по существу неправильно. Растянутый — значит более широкий, растянутый более широко. По смыслу этого слова пределы растянутого диапазона должны быть шире, чем обычного, т. е. перекрытие волн должно быть больше, скажем, не в 3 раза, как обычно, а в 5—6 раз. Мы же имеем не растянутый, а сильно укороченный диапазон: пределы перекрытия сокращены почти в 30 раз. На «растянутом» диапазоне самая длинная волна превышает самую короткую лишь в 1,1—1,2 раза. А это значит, что диапазон не растянут, а скорее сжат, сильно сокращен. Но в результате такого сокращения сильно растянулась шкала: тот маленький участок, который на ней занимал диапазон при обычной шкале, теперь растянулся на всю шкалу. Поэтому правильнее было бы назвать это усовершенствование «растянутой шкалой», что больше соответствует действительности.



Как работает усилительный каскад с электронной лампой?

Общая схема его работы проста. К сетке лампы подводится переменное напряжение. В соответствии с изменениями напряжения изменяется величина анодного тока. Этот ток, проходя по сопротивлению анодной нагрузки, создает на нем переменное падение напряжения, которое и является выходным напряжением каскада.

Картина будет действительно такой лишь при условии, что при неизменных напряжениях на электродах анодный ток остается строго постоянным.

Так ли это в действительности? Можно ли считать анодный ток строго постоянным?

В действительности анодный ток лампы при неизменном напряжении на сетке, аноде и всех других электродах не сохраняет полного постоянства. Величина анодного тока в конечном счете зависит от эмиссии катода — числа электронов, излучаемых катодом и достигающих анода в единицу времени, а эмиссия катода подвержена известным колебаниям. В одинаковые отрезки времени катод излучает не строго одинаковое число электронов. Разница в количестве излучаемых электронов ничтожна, но тем не менее она существует, и в соответствии с этим анодный ток претерпевает небольшие изменения хаотического характера, приводящие к появлению на сопротивлении анодной нагрузки некоторого переменного напряжения.

Поток электронов, создающих анодный ток, не имеет такой однородной структуры, как, например, струя воды. Его скорее можно уподобить струе дроби, вытекающей, скажем, из какого-то сосуда; при этом число дробинок, выпадающих в разные моменты времени, неодинаково. Эта аналогия, а также то, что переменное напряжение, создаваемое на анодной нагрузке лампы, прослушивается в громкоговорителе или телефоне в виде шума, по своему характеру напоминающего шум сыплющейся дроби, дали основание назвать это явление «дробовым эффектом».

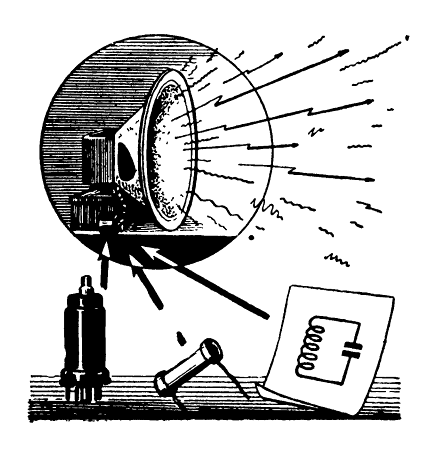
Шум, порождаемый «дробовым эффектом» в одном каскаде, почти незаметен, но если после шумящего каскада имеется еще несколько усилительных каскадов, то шум будет ими усилен и может достигнуть такой величины, с какой нельзя не считаться. Чем больше электродов у лампы, тем больше шумов она создает. Меньше всего шумят триоды. Пентоды шумят примерно раза в 2—3 сильнее триодов. Больше всего шумят многосеточные преобразовательные и смесительные лампы. Эта особенность ламп различных типов очень невыгодна. Естественно, что в первых каскадах приемников и усилителей желательно применить наименее «шумливые» лампы, так как создаваемый ими шум усиливается всеми последующими каскадами. В этом отношении наиболее благополучны триоды — как раз те лампы, которые в первых каскадах не применяются.

В первом каскаде супергетеродинных приемников в большинстве случаев работают преобразовательные

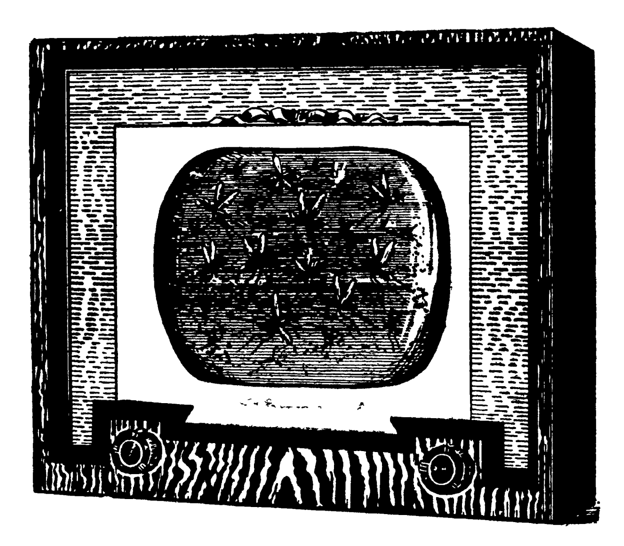
лампы, наиболее интенсивно шумящие. Порождаемый ими шум усиливается всеми лампами приемника и, как правило, весьма явственно прослушивается на выходе. Этот шум получил название «суперного шума». Это не значит, конечно, что в приемниках прямого усиления шумы отсутствуют. Если чувствительность высока, то и в таком приемнике шумы будут достаточно велики.

Лучшей мерой борьбы с суперным шумом служит применение усилительного каскада до преобразователя, т. е. устройство в супергетеродинном приемнике усилителя высокой частоты. В усилителе высокой частоты используются пентоды, шумящие значительно меньше преобразовательных ламп. Усиленные этим каскадом сигналы приходят к сетке преобразовательной лампы с более выгодным соотношением напряжений сигнала и шума. Но способ этот дорог и применяется только в первоклассных приемниках.

Лампы шумят тем меньше, чем больше их крутизна характеристики при относительно малом анодном токе.



Расчет показывает, например, что на входе радиовещательного приемника высокочастотный пентод 6К3 создает напряжение шумов около 1 *мкв*, а телевизионный пентод 6Ж4 — всего около 0,25 *мкв*. Лампа 6А7 — преобразователь частоты — дает напряжение шумов около 5 *мкв*, т. е. в 20 раз больше, чем 6Ж4. А это означает, что сигналы с напряжением до 5 *мкв* будут совершенно заглушены шумами, да и сигналы с напряжением



10 *мкв* будут слышны на фоне сильного шума. Шумят не только лампы, но и сопротивления и даже колебательные контуры.

Величина шумов связана также с полосой частот, пропускаемой приемником, а именно: действующее напряжение шумов пропорционально квадратному корню из полосы пропускания. Чем шире полоса, тем сильнее сказываются шумы, порождаемые «дробовым эффектом». Поэтому в высококачественных приемниках, обладающих широкой полосой пропускания, шумы чувствуются относительно сильнее, чем у приемников, пропускающих более узкую полосу. В этом отношении в наименее выгодных условиях оказываются телевизионные приемники с полосой порядка 4 *Мгц*. Они «шумят» в десятки раз сильнее радиовещательных приемников.

Телевизионные приемники дают возможность не только слушать шумы ламп, но и видеть их. Если всмотреться в экран работающего телевизора, то можно заметить на нем множество как бы роящихся мошек. На профессиональном жаргоне телевизионных работников эти точки носят название «мурашек». Эти «мурашки» в значительной степени представляют собой усиленные шумы первых ламп телевизора. Чем чувствительнее телевизор, тем больше «мурашек» (или «снега») на экране.



Антенна с сердечником

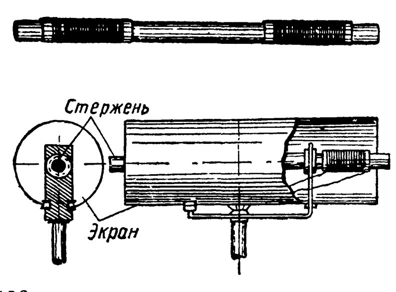
Мы привыкли к тому, что сердечники бывают у трансформаторов, дросселей, катушек. Но как можно «вставить» сердечник в антенну?

Конечно, в наружную антенну поместить сердечник мудрено, но ничто не может помешать нам намотать антенный провод на длинный сердечник, имеющий вид прутка или стержня. Стержень этот должен быть изготовлен из магнитодиэлектрика (высокочастотного магнитного материала) с большой магнитной проницаемостью, например карбонильного железа, того самого, из которого делаются сердечники для контурных катушек, или — еще лучше — феррита.

Почему во вторичной обмотке трансформатора, намотанной отдельно от первичной обмотки на общем сердечнике, наводится э. д. с.? Она наводится потому, что в сердечнике, на котором намотана вторичная обмотка, возникает переменное магнитное поле. Каждый раз, когда магнитное поле внутри витка претерпевает изменение, в витке возбуждается э. д. с.

Ферромагнитные материалы замечательны тем, что если поместить их в магнитном поле, то внутри них создается бо́льшая концентрация силовых линий, чем в окружающем пространстве.

Эти два положения и использованы для создания магнитной антенны, которую мы назвали в заголовке антенной с сердечником. Передающая станция создает переменное электромагнитное поле; нас в данном случае интересует его магнитная составляющая. Магнитное поле направлено горизонтально. Если в это магнитное поле поместить ферромагнитный стер-



жень, то внутри него магнитный поток будет во много раз сильнее. Поле это — переменное. Если на этот ферромагнитный стержень намотаем витки, то поскольку внутри них будет находиться переменное магнитное поле, в витках будет наводиться соответствующая э. д. с. Естественно, что если сердечник выполнен в виде стержня, то наиболее сильный магнитный поток появляется в нем тогда, когда направление стержня совпадает с направлением магнитных линий поля, другими словами когда ось сердечника расположена перпендикулярно направлению на принимаемую станцию.

Поэтому магнитная антенна обладает направленным действием: она лучше всего принимает, когда направление ее сердечника перпендикулярно направлению на станцию. Чем больше магнитная индукция материала сердечника, тем сильнее магнитное поле внутри него. Современные материалы обладают большой магнитной проницаемостью (порядка нескольких сотен или даже тысяч), и поэтому сердечники из них могут быть сделаны сечением всего 3—5 *см²*. Такие сердечники вполне обеспечивают достаточный магнитный поток внутри витков антенны. Поэтому размеры магнитной антенны получаются небольшими; их длина для радиовещательного диапазона волн составляет всего 20—30 *см*.

Рамочная и магнитная антенны по своим общим свойствам и по своему отношению к магнитному полю одинаковы. В отношении ориентации они по существу также одинаковы. Чтобы принять на рамочную антенну, надо, чтобы плоскость витка совпала с направлением на передающую станцию. А чтобы принять на магнитную антенну, надо расположить ее так, чтобы ось сердечника была перпендикулярна этому направлению, но при этом плоскость витков как раз и будет направлена на станцию.

Нам надо отметить, что направленное действие рамочной и магнитной антенн может быть в полной мере обнаружено лишь при приеме на открытом месте. В комнатах металлические предметы служат вторичными излучателями, и прием получается при ориентировании антенны на них.



Слово «антенна» по-гречески означает усики или щупальцы насекомых. Мы протягиваем свои щупальцы-антенны в пространство — «эфир», как его раньше называли, и «вылавливаем» там нужные нам радиопередачи.

Захват этой «добычи» выражается в возникновении на антенне микроскопических напряжений. Эти напряжения так малы, что счет им ведется на миллионные доли вольта — микровольты. Нужда в измерении столь малых долей вольта возникла именно в радиотехнике. Другим областям техники не приходилось иметь дело с такими ничтожными напряжёниями. Их невозможно не только измерить, но даже обнаружить при помощи обычных приборов. Для измерения их применяются специальные сложные установки. Человеческий организм таких напряжений не ощущает, поэтому хотя антенна, строго говоря, и является токонесущим проводом, ее, казалось бы, можно считать совершенно безопасной.

Но это не так. Иногда — это может случиться во всякое время года — из антенны начинают сыпаться искры. Искры длиной до нескольких сантиметров с громким треском проскакивают между антенной и заземленными предметами, чаще всего между антенным снижением и проводом заземления. В такие моменты не рекомендуется прикасаться к антенне — можно получить очень сильный удар. Обычно еще до прикосновения к антенне между нею и рукой проскакивает искра, причиняющая резкую боль.

Что такое электрическая искра?

Ответ на этот вопрос легко найти в учебниках физики. Искра является одним из видов прохождения электрического тока через газы. В газах электрический ток образуется как движущимися электронами, так и ионами. В воздухе всегда имеется некоторое количество свобод-

ных ионов. Например, в 1 *см*³ комнатного воздуха число их достигает нескольких тысяч.

Если между двумя проводниками, находящимися в газовой среде, имеется электрическое напряжение, то ионы газа в промежутке между этими проводниками приходят в движение. При достаточно большом напряжении скорость ионов становится столь значительной, что они, испытывая при своем движении неизбежные столкновения с молекулами или атомами газа, ионизируют их. Образованные ионы в свою очередь начинают движение и ионизируют другие атомы.

Этот быстро нарастающий лавинный разряд и называется электрической искрой. Давление, образуемое ионами в электрической искре, достигает нескольких сотен атмосфер.

Расстояние между электродами в газе, которое может быть преодолено искрой, зависит не только от величины напряжения, но и от ряда других причин: давления газа, его состава, числа свободных ионов, формы электродов и др. Легче всего искра проскакивает между остриями. В комнатном воздухе, для того чтобы «пробить» искрой промежуток между остриями 15 *мм*, нужно напряжение около 20 000 *в*. Если электроды закруглены или плоски, то такое напряжение может пробить промежуток не больше 5—6 *мм*.

Каждый, кто наблюдал проскакивание искр между антенной и заземленными предметами, знает, что длина искр бывает довольно значительной. Не редкость искры длиной 10—20 *мм*, а искры 2—4 *мм* обычны. Между тем для их образования, даже между остриями, нужны тысячи вольт.

Откуда же берутся такие огромные напряжения?

Разумеется, сигналы радиостанций тут ни при чем. Появление столь больших напряжений объясняется другими причинами.

Чаще всего наведение высокого напряжения в антеннах происходит во время грозы. При грозовых разрядах, которые мы называем ударами молнии, в окрестных проводниках наводятся электрические заряды. Если проводники заземлены, то наведенные заряды немедленно стекают в землю; если же они изолированы, то заряды на них удерживаются, могут накапливаться и дости-

гать больших величин, достаточных для искрового разряда между ними и землей.

Антенны всегда бывают хорошо изолированы и обладают большой протяженностью, поэтому они заряжаются до высокого напряжения даже на значительном растоянии от района действия грозы, т. е. от того места, где непосредственно происходят грозовые разряды.

Но заряды на антеннах могут появляться и накапливаться не только во время грозы.

Снежинки очень часто несут на себе электрические заряды. Касаясь антенны при своем падении, они отдают ей заряды. Если воздух сух, а это обычно бывает



при сильных морозах, то миллионы снежинок могут в конце концов зарядить антенну до очень высокого потенциала. Такое же явление наблюдается и летом при сухом пыльном ветре. Пылинки, ударяясь об антенну, заряжают ее.

Таковы причины тех искр, которые иногда сыплются из антенного провода. Эти искры опасны. Они могут нанести весьма болезненный удар, повредить приемник, иногда стать причиной пожара. Чтобы избежать всего этого, надо всегда по окончании приема заземлять антенну. Надо также прекращать прием и заземлять антенну и в тех случаях, когда усиливаются атмосферные

разряды, т. е. трески, сопровождающие и заглушающие радиоприем. Эти трески свидетельствуют о том, что на антенне по той или иной причине возникают необычно большие заряды.

Антенны заземляют обычно грозовым переключателем. Из сказанного ясно, почему у этих переключателей заземление должно быть подведено к ножу. В этом случае при заземлении антенны к соединенному с антенной зажиму приближается заземленный нож, и если на антенне есть заряд, то при достаточном приближении ножа искра проскочит между антенной и ножом. Производящий заземление человек не пострадает. Если же к ножу присоединена антенна, то прикосновение к нему может вызвать удар.



Один из многочисленных читателей, так или иначе откликнувшихся на первое издание «Занимательной радиотехники», писал в своем письме:

«Недавно я перелистывал журнал «Радиолюбитель» за первые годы его издания. Этот хороший журнал всегда находил на своих страницах место для веселых шуток. Мое внимание привлек один из советов шутливой «консультации» — использовать для заземления цветочный горшок. Не нужно рыть землю, закапывать в нее металлические листы или припаивать провода к водопроводным трубам. Достаточно гнездо «Заземление» радиоприемника соединить проводом с землей в цветочном горшке, стоящем на окне. Этот «совет» сопровождал карикатурный рисунок.

Мой радиоприемник стоял на столе. Он, как и почти все современные радиоприемники, работал без заземления. На окне было несколько горшков с цветами. Мне пришло в голову проверить «совет». Я отрезал кусок

провода, один конец его соединил с гнездом «Заземление» радиоприемника, а другой сунул в сырую землю одного из горшков. И представьте себе мое изумление, когда я убедился в том, что шуточный совет дает совсем не шуточные результаты — приемник заработал лучше, громкость приема явно возросла!

Чем это объясняется?»

Самая простая антенна — прямой провод. Приемник (или передатчик) надо включить в середину этого провода. У антенны имеются как бы два усика. Именно такие антенны имели радиоаппараты первоначально; часто подобными антеннами пользуются и теперь. Если один «ус» изъять, то эффективность антенны будет сильно снижена.

Но мы теперь для приема радиовещания, как правило, пользуемся одним «усом». Это объясняется тем, что современные приемники очень чувствительны, а принимаемые станции обладают большой мощностью. Кроме того, осветительная сеть, так или иначе присоединяясь к радиоприемнику, играет роль заземления, вернее, роль второй части антенны. Поэтому широко утвердилось убеждение, что заземление для радиоприемника не нужно.

Это убеждение часто распространяют и на батарейные приемники, чего делать нельзя. У батарейных приемников в какой-то степени роль второй части антенны исполняют провода питания, соединяющие шасси приемника с батареями. Но эти провода очень часто бывают весьма короткими и не могут в должной степени повысить эффективность антенны. В таких условиях каждый лишний провод имеет большое значение, тем большее, чем он длиннее.

По всей вероятности, автор письма вел прием на батарейный радиоприемник, причем заземления у него не было. К приемнику был по существу присоединен лишь один «ус». Эффективность такой антенны низка. Поэтому устройство «заземления в цветочном горшке» существенно улучшило антенну, вследствие чего громкость приема возросла. Само соединение провода заземления с землей в цветочном горшке не играет в данном случае значительной роли. Более важен сам провод, соединяющий приемник с горшком, — он служит противовесом, который заменяет заземление. Горшок

с землей тоже стал частью этого противовеса, тем большей, чем больше он сам и чем лучше контакт между проводом и землей в горшке.

Письмо владельца приемника в издательство должно напомнить радиолюбителям и радиослушателям о необходимости внимательного отношения к антенне. Следует помнить, что антенное устройство состоит из антенны и заземления или противовеса. В каждом отдельном случае нужно опытным путем проверить, требуется ли заземление или же того суррогатного заземления — противовеса, который создается осветительной сетью, длинными проводами, идущими к источникам питания, и т. п., достаточно для хорошего приема.

А как же обстоит дело с шуточным советом журнала «Радиолюбитель»?

Нет сомнения в том, что авторы «совета» не учли всех обстоятельств дела. Они посмеялись над тем, что некоторые неопытные люди могут придавать значение земле как определенному веществу, которое можно взять в любом виде и количестве. Но они не учли того, что присоединение к радиоприемнику даже 1—2 *м* провода и вдобавок еще известного объема токопроводящей сырой земли может явиться противовесом, заметно улучшающим прием, повышающим эффективность антенны.



Кому не приходилось любоваться ночным небом! Его огромный купол как будто покрыт иссиня-черным бархатом, по которому разбросаны золотые брызги звезд.

Вид бездонного ночного неба рождает мысли о бескрайности вселенной, о далеких чужих мирах.

Кажется, что в ясную ночь ничто не мешает наблюдать небо. Воздух тих и прозрачен, исчезла та мгла, ко-

торая днем скрывает дали. Глядишь на небо и чувствуешь, что между тобой и мерцающими звездами нет ничего, кроме огромного расстояния.

Однако это ощущение обманчиво. Земля, словно броней, закрыта своими оболочками. Их много. Мы различаем тропосферу (0—16 *км*), стратосферу (16—32 *км*), хемосферу (32—80 *км*), ионосферу (80—400 *км*). Дальше находится пространство, которое иногда называют экзосферой, а чаще космическим пространством. По последним исследованиям, произведенным при помощи искусственных спутников и космических ракет, у Земли есть корона из атомов водорода, простирающаяся на высоту до 20—30 тыс. *км*. Помимо того, на высоте около 100 *км* есть пылевая оболочка, представляющая собой концентрацию микрометеоров. Наконец, вокруг Земли обнаружены пояса радиации, являющиеся скоплением электронов.

Все эти многочисленные оболочки можно назвать прозрачными лишь весьма условно.

Какой смысл мы вкладываем в слово «прозрачный»? Мы считаем прозрачным то, через что мы можем видеть. Видеть — значит воспринимать световые лучи. А так как световые лучи представляют собой электромагнитные колебания, то как будто можно сделать вывод, что прозрачной средой является та среда, которая пропускает электромагнитные колебания.

Такой вывод не соответствует реальной действительности. Земная атмосфера и обнаруженные в последнее время ее дополнительные оболочки непрозрачны для электромагнитных колебаний любой частоты. Вернее, земные газовые и иные оболочки пропускают только два небольших участка волн из всего известного нам огромного спектра электромагнитных колебаний, простирающегося от самых жестких гамма-лучей (примерно до $3 \cdot 10^{15}$ *Мгц*) и до самых длинных радиоволн (примерно до 10 *кгц*). Эти участки называют окнами прозрачности.

Существование первого окна прозрачности как раз и дает нам возможность любоваться ночным небом. Через это «окно» к нам проникают видимые световые лучи ($4 \cdot 10^8$—$8 \cdot 10^8$ *Мгц*) и в некоторой степени прилегающие участки ультрафиолетовых и инфракрасных лучей. Сквозь это окно Солнце несет нам свет и тепло.

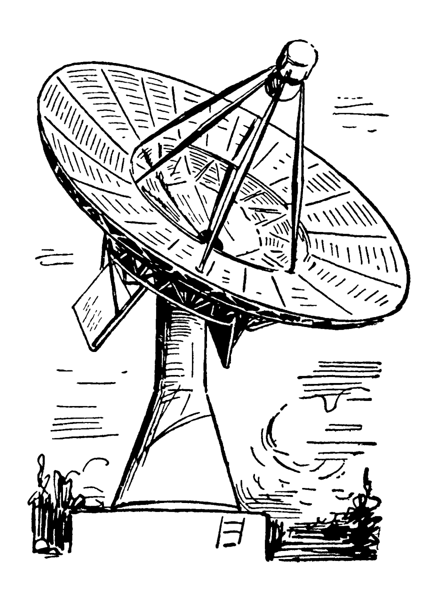
Долгое время — с того дня, когда наши предки впервые посмотрели на небо, и почти до последних дней — исследование Вселенной происходило только через это «окно». Телескопами, фотоаппаратами, спектроскопами и другими средствами ученые собирали те сведения о Вселенной, которые несли световые лучи. Изощренный человеческий разум путем хитроумнейшего анализа световых лучей сумел «извлечь» из них очень много. На результатах этого анализа зиждется все то, что мы знаем теперь о Вселенной: и общие законы, которым подчиняется движение небесных тел, и сами эти тела, их ассоциации, их температуру, массу, примерные размеры, состав, направление и скорость движения и пр. Ученые могут создать точную картину неба такой, каким оно представлялось с Земли тысячи лет назад, могут сказать, каким небо будет через 100 лет, могут предсказать небесные явления значительно точнее, чем метеорологические условия на своей собственной планете. Успехи в завоевании космоса, которыми ознаменовались последние годы, блестяще подтвердили точность всех астрономических расчетов.

Но информация, которую несут световые лучи, не бесконечна. Их анализом нельзя получить все сведения о Вселенной, которые нужны науке. Поэтому исключительно ценным оказалось открытие второго окна прозрачности, о существовании которого можно было догадываться уже давно, но начало обследования и использования которого стало возможно лишь в последние 10—15 лет благодаря успехам радиоэлектроники. Через это «окно» к нам на Землю из космического пространства могут проникать (и уходить с Земли в обратном направлении) радиоволны длиной примерно от 1 *см* и примерно до 30 *м*, т. е. от 30000 до 10 *Мгц*. Волны более длинные и более короткие поглощаются атмосферой и через нее не проходят.

Впервые это окно было практически использовано в 1946 г. для радиолокации Луны. С тех пор радиолокаторы много раз «прощупывали» Вселенную в рамках нашей Солнечной системы. Чрезвычайно удачной была наша радиолокация Венеры в 1961 г. Сигналы радиолокаторов добрались уже до Солнца.

Но радиолокация является лишь небольшой частью в использовании второго окна во Вселенную — радио-

окна. Испытания и исследования радиоволн, доносящихся к нам из Космоса, показали, что эти волны возбуждаются небесными телами и несут дополнительную информацию, которую часто невозможно получить от световых лучей. Заметим здесь для пояснения, что уже обнаружено много темных скоплений материи, излучающих радиоволны, но не излучающих световые волны и поэтому остававшихся неизвестными. В результате начала быстро развиваться новая отрасль астрономии — радиоастрономия, вооруженная радиотелескопами и другими средствами исследования при помощи улавливания или посылки радиоволн и их анализа.



С течением времени использование радиоокна во Вселенную будет все расширяться. Связь с космическими кораблями и искусственными спутниками, космонавтами на других планетах и др. несомненно будет во многом пользоваться этим «окном».



От антенны передающей радиостанции оторвалась электромагнитная волна и унеслась в пространство. Атмосфера поглощает радиоволны. Лишь для волн некоторой определенной длины атмосфера сравнительно прозрачна (см. стр. 145). Волны более длинные и более короткие поглощаются атмосферой в гораздо большей степени.

В чем состоит «механизм» этого поглощения и почему он оказывается избирательным для волн той или иной длины?

Наша атмосфера представляет собой смесь многих газов и водяного пара. Молекулы и атомы всех этих составных частей атмосферы представляют собой различные сочетания частиц, обладающих электрическим зарядом и магнитным полем, а также определенной собственной частотой колебания. Движущаяся электромагнитная волна заставляет электрически заряженные частицы колебаться (так же, как она заставляет их колебаться в приемной антенны). Частицы, собственная частота которых совпадает с частотой движущейся волны, начинают колебаться сильно — с большим размахом. На это расходуется энергия, которой взяться больше неоткуда, как от электромагнитной волны. Энергия волны затрачивается на приведение в сильные колебания резонирующих частиц и ослабевает. Чем больше таких частиц и чем длиннее путь, проходимый в атмосфере волной, тем больше она затухает.

Атмосфера состоит из определенных газов, часть которых ионизирована. Эти газы обладают определенными резонансными частотами, которые они и поглощают. Частоты, не встречающие на своем пути резонансных частиц, проходят с минимальным поглощением. Так образуются «окна прозрачности».



Выходные каскады передатчиков радиолокационных станций работают в течение очень коротких промежутков времени, соответствующих посылке импульсов. В промежутках между импульсами выходные каскады таких передатчиков не работают.

Каков же все-таки фактический «рабочий день» выходного каскада такого передатчика? Какой промежуток времени при круглосуточной эксплуатации этот каскад в действительности работает и сколько он отдыхает? Без расчета трудно дать правильный ответ на этот вопрос, потому что частая повторяемость импульсов — сотни и тысячи раз в секунду — заставляет предположить, что даже при крайне малой длительности самих импульсов их суммарная продолжительность будет не так-то мала.

Попробуем произвести примерный подсчет.

Предположим, что радиолокационный передатчик должен обнаруживать объекты на расстояниях до 150 *км*. Путь, который должна проделать радиоволна, равен 300 *км*. Так как в секунду радиоволна пролетает 300 000 *км*, то на преодоление пути в 300 *км* ей потребуется 300 : 300 000 = 0,001 *сек*, т. е. 1 *мсек*.

Продолжительность импульса такого передатчика пусть будет 1 *мксек*, а число импульсов в секунду равно 1 000, что соответствует установленной нами продолжительности промежутков между импульсами.

Следовательно, такой передатчик излучает только в течение 1/1 000-й доли рабочего времени.

Сутки содержат 86 400 *сек*. Значит, в течение суток передатчик будет излучать лишь в течение 86 400/1 000 = = 86,4 *сек* = 1 *мин* 24,6 *сек*, т. е. всего лишь 1,25 *мин*! Если эту цифру незначительно округлить, то получится, что 8-часовой рабочий день выходной каскад импульсного передатчика, работающего в таком режиме, выполнит лишь за год.

Таков может быть несколько неожиданный итог наших подсчетов.



До сих пор спутник Земли — Луна была окутана тайной. Люди прекрасно изучили половину Луны, а другая ее часть настолько надежно закрыта от наших взоров, что увидеть ее было невозможно. Люди даже не мечтали об этом. Ведь Луна обращается вокруг Земли так, что к нам обращена лишь одна ее половина, а вторая скрыта от взора обитателей Земли.

Гением советских людей открыта тайна второй половины лунной поверхности. И решающую роль в этом разоблачении сыграли радиотехника и радиоэлектроника.

Как известно, третья советская космическая ракета, достигнув района Луны, обогнула ее и, обходя невидимую с Земли часть лунной поверхности, сфотографировала ее и передала на Землю полученное изображение. Для осуществления этого на ракете был установлен целый комплекс радиотехнической аппаратуры.

Задача распадалась на две части: первая — увидеть таинственную половину Луны и вторая — передать увиденное на Землю.

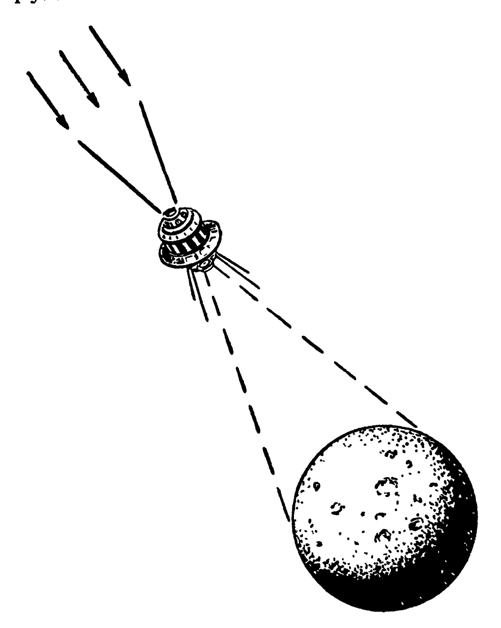
Если предположить, что увидеть обратную сторону Луны с помощью ракеты удастся, то возникал вопрос: как передать увиденное на Землю? Ведь осуществить телевизионную передачу с ракеты, облетающей Луну с обратной стороны, пока было трудно из-за большого расстояния.

Поэтому было принято следующее техническое решение: пролетая над обратной стороной Луны, имевшаяся на космическом корабле фотосъемочная аппаратура фотографировала Луну, а передача полученных изображений на Землю производилась позднее, уже после удаления ракеты от Луны и приближения к Земле. С этой целью была создана сложнейшая фотосъемочная аппаратура, которая включалась в действие по команде с Земли. На специальную фотопленку фотографирова-

лась поверхность Луны, затем эта пленка автоматически проявлялась и просушивалась. После этого в нужный момент, опять-таки по команде с Земли, включалась телевизионная аппаратура, с помощью которой фотоизображение передавалось по радио на Землю примерно по такому же принципу, как при обычном «земном» телевидении передаются кинофильмы.

На Земле телевизионное изображение не только наблюдалось в момент приема, но и записывалось различными способами, для того чтобы его можно было в дальнейшем детально изучить.

Описанный принцип в нашу эру необычайных свершений кажется простым, но с какими огромными техническими трудностями он был связан!



Мы уже не говорим о сложности процесса фотосъемки и телевизионной передачи на большом расстоянии, осуществлявшемся посредством сложной системы автоматики. Не говорим и об исключительных трудностях конструирования и создания разнообразнейшей малогабаритной и надежно действующей радиоэлектронной аппаратуры для ракеты, об обеспечении этой аппа-

ратуры бесперебойно действующими источниками электропитания. Но никак нельзя не остановиться на тех трудностях, которые были связаны с передачей и приемом радиосигналов на таком огромном расстоянии.

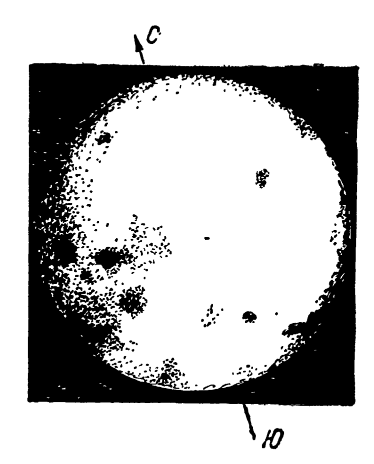
На Земле, на расстоянии около полумиллиона километров, нужно было принять сигналы, посылаемые с ракеты передатчиком мощностью всего в несколько ватт.

Этот передатчик излучает свою энергию во все стороны, и на земную поверхность приходится лишь ничтожнейшее количество ее, которое можно подсчитать, если учесть, что на этом расстоянии вся мощность передатчика как бы распределяется при наибольшем удалении ракеты по поверхности сферы радиусом 500 000 *км*. В таких условиях каждый ватт мощности, излучаемой передатчиком ракеты, создает на 1 $м^2$ поверхности Земли мощность примерно $3 \cdot 10^{-28}$ *вт*, т. е. в результате принимаемые сигналы оказываются примерно в 1 млрд. раз слабее, чем сигналы, принимаемые от земных радиостанций. И эти сигналы нужно не только обнаружить, но и достаточно хорошо выделить на фоне сильных помех, создаваемых в приемнике как его собственными внутренними шумами, так и помехами космического происхождения.

Задача приема таких слабых сигналов решалась высокочувствительным приемником и высокоэффективными приемными антеннами. При передаче изображений, несмотря на их высокую четкость, доходившую до 1 000 строк на кадр (т. е. в 1,5 раза выше, чем при обычном земном телевидении), полоса пропускания приемника была в целях снижения уровня шумов резко снижена. Это оказалось возможным потому, что скорость передачи неподвижного изображения, зафиксированного на фотопленке, могла быть в отличие от обычного телевидения сильно замедлена.

Для гарантии надежности работы вся аппаратура как на борту ракеты, так и на Земле была дублирована и агрегаты, вышедшие из строя, могли быть немедленно заменены запасными по радиосигналу с командного пункта на Земле.

Разработанная система передачи с предварительным фотографированием имела еще и то достоинство, что изображение можно было передавать неоднократно.



Предусматривалось также, чтобы на больших расстояниях от Земли передача изображений производилась медленно, а на малых расстояниях — в более быстром режиме.

Радиоэлектронная аппаратура была в основном транзисторной.

На Земле, как уже упоминалось, телевизионные сигналы фиксировались разными спсобами — на фотопленку, на магнитную ленту (см. стр. 186), на скиатронах и открытой записью на электрохимической бумаге.

Все это вместе взятое обеспечило высокую надежность и помехоустойчивость канала радиосвязи Земля—ракета.

Таким образом, с помощью советской ракеты впервые в истории человечества была осуществлена по радио передача на сверхдальние расстояния изображений высокой четкости.



Сегодня по телевидению передают кинофильм, в котором участвуют Ваши любимые актеры. Вы решили запечатлеть их образ на фотопленке. Это — дело как будто нетрудное: фотоаппарат у Вас хороший, Вы располагаете пленкой весьма высокой чувствительности, а Ваш телевизор дает очень яркое и четкое изображение. В таких условиях и при такой технике можно производить съемку с большой скоростью, не опасаясь недодержки. Прикинув, Вы остановили выбор на экспозиции

1/1 000. При такой малой выдержке снимок наверняка не будет «смазан».

Вот снимки сделаны и проявлены. С нетерпением Вы вынимаете пленку из проявочного бачка... Но что это? Ни на одном снимке не получилось изображения, вернее на каждом из них имеются лишь слабые следы изображения и какая-то узкая полоска, расположенная на некоторых кадрах вверху, на других — внизу или около



середины. Есть даже один кадр, на котором совсем нет полоски.

Вас прежде всего заинтересовали эти странные узкие полоски. Вы достаете лупу и разглядываете их. При увеличении в них можно кое-что разобрать. Вот глаз и часть носа, вот какая-то ветка...

Чем же объясняется такой странный результат съемки?

Объясняется он очень просто. Фотоаппарат с присущей ему беспристрастностью добросовестно показал то, на что был направлен его объектив. А в действительно-

сти на экране телевизора никаких изображений нет, нам только кажется, что они есть. Изображения на экране телевизора — обман зрения. Если бы мы могли открыть глаза только на десятую или сотую долю микросекунды, то увидели бы темный экран и на нем одну единственную маленькую светлую точку.

В каждый данный момент на экране телевизора светится лишь одна крохотная точка. Точка бежит по экрану, прочерчивая строку за строкой и постоянно изменяя яркость. Она то вспыхнет очень ярко, то почти погаснет, а иногда и действительно совсем гаснет. За одну двадцать пятую долю секунды точка успевает прочертить весь экран сверху донизу, уложив на нем 625 строк, и снова вернуться к началу. Но наш глаз обладает способностью удерживать полученное изображение в течение примерно $^{1}/_{15}$ *сек*. Поэтому мы не различаем быстрого движения точки. След ее движения сливается для нас в одно связное изображение подобно тому, как ракета представляется нам не в виде движущейся точки, а в виде яркой полосы на темном фоне ночного неба.

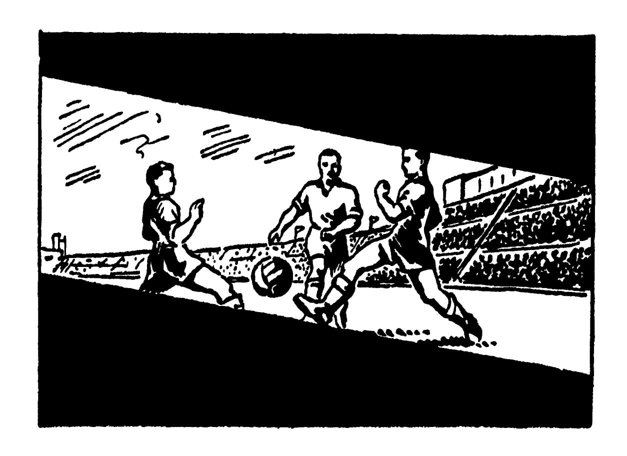
Но фотоаппарат обмануть нельзя. Он запечатлевает только то, что «видит» на самом деле. В нашем примере объектив фотоаппарата был открыт 0,001 *сек*. За такой промежуток времени точка успевает прочертить на экране всего $15^{1}/_{2}$ строки — узкую полоску, охватывающую $^{1}/_{20}$-ю часть кадра. Поэтому на каждом фотоснимке и оказалось лишь по такой узкой полоске, находившейся в той части кадра, где захватил ее открывшийся объектив аппарата.

Почему же все-таки на наших фотоснимках виден слабый намек на изображения? Это объясняется тем, что экран телевизионной трубки обладает некоторым послесвечением. Те точки экрана, которые только что облучил электронный луч, продолжают слабо светиться, постепенно затухая, в течение нескольких сотых или даже тысячных долей секунды. Это послесвечение в виде слабого следа изображения и запечатлел фотоснимок.

Чем же объяснить то, что на одном из снимков вообще ничего не получилось? Объяснение очень простое — снимок был сделан в промежутке между двумя кадрами, т. е. во время обратного хода луча от последней строки к первой. Продолжительность этого обратного хода как раз 0,001 *сек*, т. е. равна времени нашей экспозиции.

Если бы электронный луч во время обратного хода не гасился, то мы обнаружили бы на снимке косую линию, прочерчивающую экран снизу доверху. Но луч, совершающий обратный ход, гасится, поэтому он и не виден на фотопленке. На ней можно разглядеть лишь слабые контуры последних строк изображения — результат послесвечения экрана.

Отсюда вывод: фотографировать изображения на экране телевизора надо с выдержкой не менее $^1/_{25}$ *сек*, иначе полного кадра не получится.



Такие результаты, какие описаны выше, получаются при съемке аппаратами с центральным затвором, например ирисовым. Но не все фотоаппараты имеют такие затворы, поэтому результаты фотосъемки с экрана телевизора могут быть и другими.

Снимок сделан и проявлен. К удивлению фотографа, весь снимок не получился. Его общее поле черное, и на нем видна лишь косая наклонная полоса с соответствующими частями изображения.

Виновников такого «косого» фотоснимка два — большая скорость съемки и шторная конструкция затвора. Шторные затворы имеют большинство так называемых малоформатных фотоаппаратов, снимающих на кинопленку. В аппаратах этого типа перед фотопленкой движется черная светонепроницаемая шторка с вертикальной щелью. Ширина щели и скорость ее движения зави-

сят от установленной выдержки. Щель движется справа налево, если смотреть со стороны объектива. Изображение на фотопленке получается перевернутым, поэтому щель фактически перемещается по снимку слева направо, т. е. так же, как прочерчиваются на экране строки.

За $^1/_{50}$ *сек* луч прочертит на экране весь кадр, уложив на нем одно поле в 312,5 строки (фактически несколько меньше, но это для наших рассуждений значения не имеет) четных или нечетных, так как у нас принята чересстрочная развертка. Если щель будет проходить кадр за $^1/_{50}$ *сек*, то на снимке окажется экспонированной косая полоса, так как строка движется по изображению сверху вниз, а щель движется слева направо.

Фактическая ширина полосы зависит от ширины щели, а ее наклон — от продолжительности выдержки. Чем меньше выдержка, тем меньше будет наклон полосы. При выдержке, равной $^1/_{50}$ *сек*, и совпадении начала движения шторки затвора с началом движения луча по верхней строке полоса пройдет как раз от левого верхнего угла снимка к его правому нижнему углу.

Отсюда вывод: для того чтобы получить полноценный снимок с экрана телевизора аппаратом со шторным затвором, надо сделать продолжительность выдержки больше продолжительности передачи обоих полей кадра, т. е. больше $^1/_{25}$ *сек*, например $^1/_{10}$ *сек*. Если выдержка будет очень длинной, то движущиеся изображения могут «смазаться».



Строку за строкой прочерчивает электронный луч на экране телевизора. Из строк складываются неподвижные кадры, смена кадров порождает на экране движение. На экране плещется море, мчатся поезда и автомобили, работают станки, трудятся и отдыхают, веселятся и го-

рюют люди. Полтора часа проводим мы перед экраном телевизора, пока передается новый кинофильм, живем одной жизнью с его героями, вместе с ними преодолеваем препятствия и вместе с ними радуемся их успехам и победам.

Вот промелькнул последний кадр, и фильм закончился. Какое же расстояние и с какой скоростью пробежал электронный луч по экрану за эти 1,5 *ч*?

Это нетрудно подсчитать. По действующему у нас стандарту телевизионное изображение делится на 625 строк; в секунду передается 25 кадров. Следовательно, в секунду электронный луч прочерчивает $25 \times 625 = 15\,625$ строк.

Продолжительность прочерчивания одной строки составляет $1 : 15\,625 \times 0{,}000064$ *сек* = 64 *мксек*.

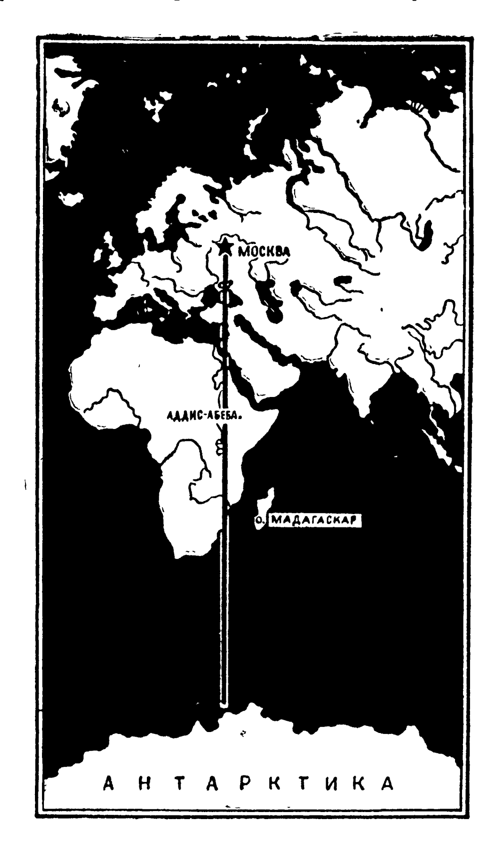
За эти 64 *мксек* электронный луч не только прочерчивает на экране видимую нами строку, но и совершает «прыжок» к началу следующей строки. Это время обратного хода равно примерно 8 *мксек*, поэтому действительная длительность пробега лучом одной строки равна приблизительно 56 *мксек*.

Теперь уже легко ответить на поставленные вначале вопросы. У телевизора с 18-сантиметровой электронно-лучевой трубкой длина строки 14 *см*. Значит, телевизионная «точка» за 56 *мксек* пробегает 14 *см*. В секунду она пробежит $14 : 0{,}000056 = 250\,000$ *см*, а за час — еще в 3 600 раз больше: $250\,000 \times 3\,600 = 900\,000\,000$ *см* = 9 000 *км*.

Телевизионная «точка» мчится по самому маленькому экрану телевизора со скоростью 9 000 *км/ч*. Это вдвое больше начальной скорости винтовочной пули. За время передачи кинокартины, т. е. за 1,5 *ч*, «точка» совершит по экрану телевизора путешествие в 13 500 *км*. Представим себе, что, начав свой бег в Москве, эта «точка» направилась на юг. Немногим больше, чем через 8 *мин*, она достигнет Черного моря в районе Новороссийска. Через 33 *мин* после вылета из Москвы наша быстрокрылая «точка» пролетит мимо Аддис-Абебы — столицы Эфиопии. Еще через 7 *мин* она, несясь по равнинам Центральной Африки, вблизи оз. Виктория пересечет экватор. Спустя 13 *мин* на траверсе о. Мадагаскар она расстанется с Африкой и ринется в воды Индийского океана. Наконец, в те секунды, когда мы будем прощаться с героя-

ми фильма, наша телевизионная «точка» достигнет Южного полярного круга и закончит свой стремительный бег где-то на подступах к Антарктике.

Такова «протяженность» кинокартины, разложенной на телевизионные строки. Заметим, кстати, что кинолента с кадрами этой картины имеет длину 2 700 *м*.



Несмотря на то, что приведенные цифры очень велики, они для телевидения являются минимальными, поскольку мы в качестве примера взяли экран телевизора КВН-49 — самый маленький из телевизионных экранов. Экраны телевизоров других типов больше, поэтому и соответственные цифры для них тоже больше. Некоторые из них приведены в таблице.

Телевизор	Длина строки	Скорость движения точки по экрану, *км/ч*	Путь, проходимый точкой за 1,5 *ч*
„Рекорд“	28	18 000	27 000
„Знамя“	34	21 000	31 500
„Алмаз“	44	28 000	42 000
„Топаз“ (проекционный)	120	77 000	115 500

Из таблицы видно, что особенно велики цифры, относящиеся к проекционным телевизорам. За время передачи кинокартины пробег точки по экрану клубного проекционного телевизора «Топаз» почти в 3 раза превышает длину окружности земного шара, т. е. «точка» совершит три кругосветных путешествия, а путь, проделываемый телевизионной точкой по экрану большого проекционного телевизора, равен расстоянию от Земли до Луны.



Одним из очень неприятных недостатков, резко ухудшающих качество телевизионных изображений, является двоение. Двоение состоит в появлении на экране, справа от нормального изображения, второго изображения, обычно значительно более слабого. Иногда на экране можно насчитать даже несколько таких повторных изображений.

Чем же объясняется это неприятное явление?

Когда электромагнитная волна — сигнал, посланный передающей станцией, — достигает приемной антенны, в соответствующем месте экрана появляется светящаяся точка. Если эта волна далее на своем пути встретит пре-

пятствие, то она от него отразится. Отраженный луч, достигнув снова приемной антенны, вызовет появление на строке второй точки, которая расположится правее первой.

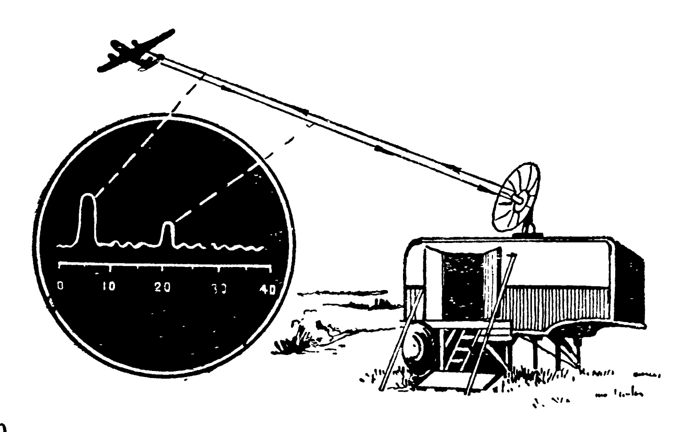
Расстояние по строке между первой точкой, соответствующей принятому сигналу, и второй, соответствующей приему отраженного сигнала, определяется, как и в радиолокации, скоростью строчной развертки и расстоянием от приемной антенны до препятствия, от которого отразился луч. Эти «радиолокационные» данные телевизора не так трудно подсчитать.

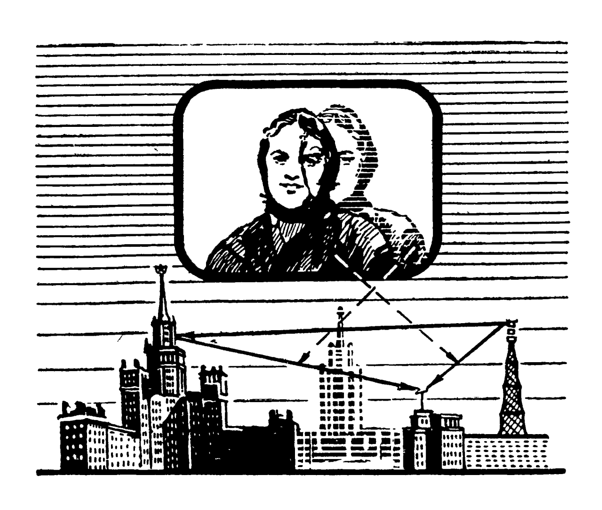
Время развертки одной строки при существующем телевизионном стандарте составляет 56 *мксек* (см. стр. 137). У телевизора КВН-49 длина строки равна 140 *мм*, следовательно луч пробегает по строке 1 *мм* за

$$0{,}000056 : 140 = 0{,}0000004 \text{ } сек = 0{,}4 \text{ } мксек.$$

Скорость распространения радиоволн 300 000 000 *м/сек*; за 0,4 *мксек* радиоволна пролетит 300 000 000 × × 0,0000004 = 120 *м*.

Эти 120 *м* представляют собой тот путь, который радиоволна должна проделать от антенны до препятствия и обратно, поэтому расстояние от антенны до препятствия будет вдвое меньше, т. е. 60 *м*. Таким образом, 1 *мм* строки на экране телевизора КВН или вообще любого телевизора с 18-сантиметровой (7-дюймовой) трубкой соответствует расстоянию до препятствия около 60 *м*. Если второе изображение получается на экране





такого телевизора на расстоянии 2 *мм* правее основного, то, значит, волна отразилась от препятствия, находящегося примерно в 120 *м* позади антенны.

У телевизора с электронно-лучевыми трубками большего диаметра цифры будут другие.

Наибольший сдвиг между изображениями (на экране КВН-49), который приходилось наблюдать, не превышал 25—30 *мм*, что соответствовало расстоянию до препятствия 1,5 *км*. Вероятно, при более далеких расстояниях до препятствий отраженный луч оказывается настолько слабым, что не создает на экране видимого изображения. Здесь уместно заметить, что вся строка телевизора соответствует расстоянию до препятствия 8 *км* 400 *м*; другими словами, телевизор как радиолокатор позволяет определять расстояния до отражающей «цели» в пределах до 8,4 *км*.

Второе изображение бывает отчетливо заметно на экране телевизора тогда, когда сдвиг между основным изображением и отраженным составляет по крайней мере 0,5 *мм*. При меньших сдвигах мы уже не различаем двух изображений, но видим одно изображение несколько смазанное, нечеткое. В этом отношении трудно указать какой-нибудь определенный предел, но, по-видимому, стены домов, находящиеся позади антенны на расстоянии 3—4 *м*, не снижают заметно четкости изображения.

Следует отметить, что второе изображение может появиться не только при отражении сигнала от препятствия, находящегося за антенной, но также и от препятствия, находящегося сбоку между приемной антенной и передающей станцией. В этом случае по величине сдвига изображений можно судить о том, насколько путь отраженного луча больше пути прямого луча. Двоение может также возникнуть при отсутствии согласования между антенным фидером и входом телевизора.

Почему отраженный луч портит изображение, но не ухудшает звук? Ведь радиоволны звукового сопровождения отражаются точно так же, как волны, несущие сигналы изображения.

Теоретически искажения звука от воздействия на антенну отраженного сигнала, конечно, должны иметь место, но они столь незначительны, что мы их не можем заметить. На стр. 97 приводились данные, относящиеся к нашему слуховому восприятию. Услышать два звука раздельно можно лишь тогда, когда интервал между ними не менее $^1/_{15}$ *сек*, т. е. около 60 *мсек*. Между тем отраженные лучи воздействуют на приемную антенну через несколько микросекунд. Если длительность какого-либо звука увеличится на несколько микросекунд, то мы просто не заметим этого.



С давних пор радиолюбители знакомы с замираниями приема. В те времена, когда короткие волны не вошли еще в обиход, замирания удаленных средневолновых станций доставляли любителям дальнего приема много неприятностей.

Когда диапазон приемников расширился в сторону коротких волн, то радиолюбители убедились, что замирания на новом диапазоне чувствуются еще резче.

Что за причина порождает замирания?

Изучение характера распространения радиоволн разъяснило происхождение замираний. Они происходят у станций, работающих на волнах, способных в данных конкретных условиях отражаться от ионосферы, когда радиоволны доходят до радиоприемника несколькими путями. Путь, проделанный лучом, отраженным от ионосферы, длиннее, чем прямого, поэтому дошедшая до приемной антенны отраженная волна может оказаться как в фазе с «прямой» волной, так и в противофазе. В первом случае прием будет усилен, во втором — ослаблен. То же самое может произойти и тогда, когда мы прямого луча вовсе не принимаем, а до приемной антенны доходят только отраженные лучи, прошедшие разные пути.

Если бы отражающий радиоволны объект был неподвижным, то мы не замечали бы замираний. Прием одних станций оказался бы усиленным, прием других — ослабленным. Эти усиление и ослабление были бы постоянными, и мы просто считали бы, что первые станции слышны лучше вторых. Но в действительности радиоволны отражаются ионосферой, претерпевающей постоянные колебания.

Меры борьбы с замираниями удалось найти. Хорошим способом их устранения является прием на разнесенные антенны. В этом случае используется то, что замирания не бывают одновременными в двух точках, удаленных одна от другой на некоторое расстояние. Отражающая ридиоволны ионосфера колеблется, пути, проходимые отраженными волнами, от этого изменяются, в результате волны то складываются, то вычитаются.

Действенным способом является устройство в приемниках автоматической регулировки усиления. У приемника делается запас усиления, который при громком приеме не используется. Но если прием становится слабее, то усиление автоматически увеличивается и громкость приема поддерживается на прежнем уровне.

Но при чем же тут самолеты?

А вот при чем. В «эпоху» средних и коротких волн радиолюбители и радиослушатели знали о причинах за-

мираний только теоретически. Эти причины были где-то в заоблачных сферах, вне пределов досягаемости. Но вот наступила эра телевидения, и замирания стали не только слышны, но и «видны».

Телезрители, живущие вблизи аэродромов и авиатрасс, знают, какие сильные и неприятные помехи приему телевидения создают самолеты. При пролете самолета прием сигналов телевидения начинает то усиливаться, то ослабевать. Экран телевизора «дышит», смотреть изображение неприятно.

Ультракороткие волны, на которых передается телевидение, малы, и такие сравнительно большие объекты, как самолеты, хорошо отражают их. В результате приемной антенны достигают два луча: один — обычный, «прямой», и второй — отраженный самолетом. В зависимости от соотношения путей, пройденных обоими лучами, они могут быть в фазе и противофазе, значит сигнал в антенне может быть и усилен и ослаблен. Самолет летит, соотношение путей радиоволн все время изменяется, и это приводит к тому, что прием то усиливается, от ослабляется. Самолет создает самые настоящие замирания. Их мы и называем самолетными помехами.



Как надо понимать СИНХРОННОСТЬ

Во всех объяснениях передачи телевидения говорится о том, что лучи передающей и приемной электроннолучевых трубок должны двигаться совершенно одинаково: они одновременно начинают движение, и в любой момент времени луч приемной трубки должен находиться в той же точке экрана, что и луч передающей трубки.

Так ли это на самом деле? А если не так, то как надо это понимать?

Положим, что в какой-то момент развертывающий луч передающей электронно-лучевой трубки начал движение по первой строке. В соответствии с этим передатчик послал синхронизирующий импульс — сигнал, по которому должны начать движение по этой же строке электронные лучи всех приемных трубок.

Но ведь электромагнитные волны распространяются не мгновенно, а со скоростью 300 000 *км/сек*. Допустим, что наш телевизор находится на расстоянии 3 *км* от передатчика. На преодоление этого расстояния волны затратят

$$\frac{3}{300\,000} = 0{,}00001 \text{ } сек = 10 \text{ } мксек.$$

Можно сказать: стоит ли считаться с микросекундами?

Действительно, в быту мы не ведем счета микросекундам. Это слишком малый отрезок времени (хотя нам иногда и приходится, правда автоматически, учитывать и столь небольшую разницу во времени — см. стр. 91). Но в радиотехнике сверхвысоких частот микросекунда — не пустяк.

Луч приемной трубки телевизора, находящегося на расстоянии 3 *км* от передатчика, начнет движение спустя 10 *мксек* после начала движения луча передающей трубки. При том телевизионном стандарте, который принят в нашей стране, луч пробегает строку примерно за 56 *мксек*. В тот момент, когда луч приемной трубки начнет движение, луч передающей трубки пробежит уже почти пятую часть строки. Через 64 *мксек* (время пробега по строке плюс время обратного хода) луч передающей трубки уже начнет движение по следующей строке, а луч трубки нашего телевизора будет еще дочерчивать первую строку.

Еще больше будет расхождение на расстоянии 30 *км* от передатчика. Здесь отставание луча приемной трубки от луча передающей трубки составит уже 100 *мксек*, или в переводе на строки — примерно на две строки.

Если считать, что предельная дальность приема передач Московского телевизионного центра составляет около 200 *км*, то мы получим, что расхождение между лучами передающей камеры и телевизора, находящегося на таком расстоянии, превысит уже 10 строк, а с учетом применяющейся у нас чересстрочной развертки —

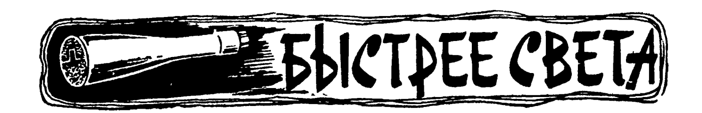
даже 20 строк. Ведь на преодоление 200 *км* радиоволнам нужно 700 *мксек*. В общем, чем дальше от телевизионного приемника находится передатчик, тем больше запаздывает изображение на приемном экране.

Интересно отметить, что это утверждение у некоторых читателей первого издания книги вызвало сомнения — не противоречит ли оно теории относительности. Они рассуждали примерно так: а каким образом рязанский зритель может определить, что изображение на экране его телевизора появляется с запаздыванием? Если он будет проверять по своим часам, поставленным по сигналам московского времени, то запаздывания не будет, так как сигнал времени сам запоздает на столько же, на сколько запаздывает телевизионный сигнал. В результате луч по экрану его телевизора начнет движение по часам микросекунда в микросекунду с передачей сигнала этого начала из Москвы по московским часам. Больше того, запаздывание нельзя будет обнаружить даже по часам, установленным в Москве и перевезенным в Рязань, потому что, по теории относительности, часы при перевозке замедлят свой ход, и по доставке их в Рязань они окажутся отстающими от московских часов на то же время, какое нужно радиосигналу для преодоления расстояния Москва — Рязань. Поэтому, мол, опаздывание изображения проверить нельзя.



В действительности же проверить запаздывание ничего не стоит. Достаточно на середине пути между Москвой и Рязанью установить два телевизора, из которых

один будет принимать сигналы непосредственно из Москвы, а второй — через Рязань, допустим от рязанского ретранслятора. При сравнении хода лучей на экранах обоих этих телевизоров окажется, что второй луч запаздывает относительно первого как раз на 700 *мксек*. Такое запаздывание совершенно реально, оно образуется в силу того, что радиосигнал распространяется не мгновенно. Это явление лежит в основе радиолокации, оно же приводит иногда — увы! — к двоению изображений на экранах наших телевизоров.



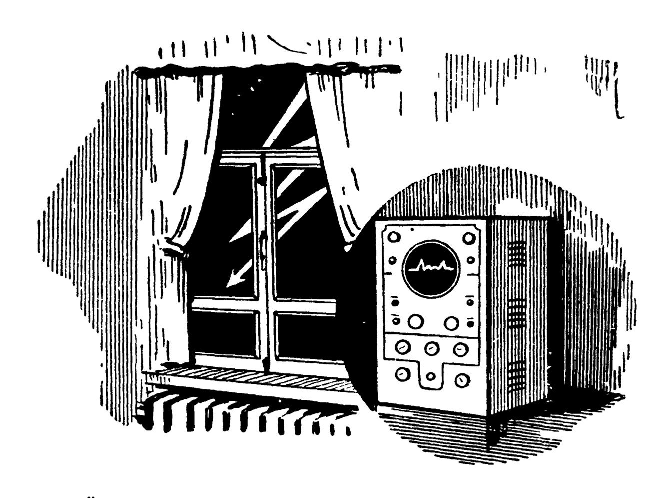
Этот заголовок заставит многих читателей насторожиться. Как это так — быстрее света? Установлено, что скорость света — 300 000 *км/сек* — есть наибольшая возможная в природе скорость, превысить которую невозможно. Это положение лежит в основе всей современной физики, является одним из ее краеугольных камней.

Но мы должны сразу же оговориться — в заголовке очерка никакого «обмана» нет. Речь идет о движении, скорость которого в действительности превышает световую, т. е. превосходит 300 000 *км/сек*.

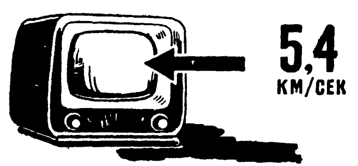
Прибором, претендующим на установление такого невероятного рекорда, является электронно-лучевая трубка.

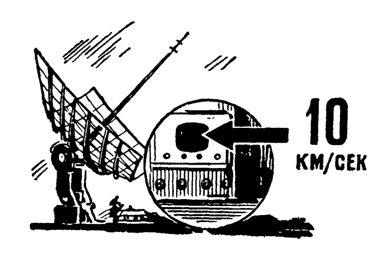
Наивысших скоростей достигает движение точки по экрану электронно-лучевых трубок, работающих в осциллографах — специальных измерительных приборах, дающих возможность наблюдать на экране ход электрических процессов.

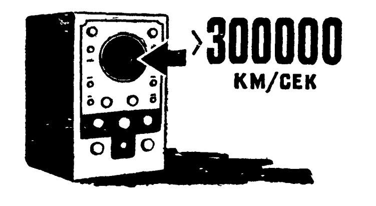
Здесь мы вплотную подошли к около- и сверхсветовым скоростям. Не будем рассматривать обычные осциллографы, у которых скорость движения пятна по экрану примерно такая же, как в телевизорах и радиолокаторах. Обратимся к специальным осциллографам, предназначенным для наблюдения сверхбыстрых процессов. Для такого осциллографа молния — слишком



медленный процесс, а ведь молния длится 10^{-7} *сек*, т. е. одну десятимиллионную секунды.







Конечно, для того чтобы регистрировать процессы такой скорости, точка должна перемещаться по экрану чрезвычайно быстро. Действительно, строку она проходит за 10^{-9} *сек*, или за одну миллиардную секунды. Для этого отрезка времени есть свое название — наносекунда. Как видим, молния длится целых 100 наносекунд. Длина строки на экране осциллографа равна 10 *см*. Точка пробегает ее со скоростью 100 000 *км/сек*.

Осциллограф с такой трубкой может регистрировать процессы в тысячу раз более быстрые, чем молния, т. е. длительностью всего 0,1 наносекунды. При регистрации процесса такой длительности точка описывает некоторую кривую об-

щей длиной около 4—5 *см*, развивая скорость 400 000—500 000 *км/сек*, т. е. скорость больше световой.

Итак, «обмана» нет. Скорость света действительно превышена, но... И тут есть свое «но». Эта скорость принадлежит не материальной частице. Светящееся пятно в его разных положениях создается разными электронами. Их последовательное попадание на различные участки экрана создает иллюзию движения точки. На самом же деле то, что мы видим на экране, не есть движение точки. Это есть последовательные появления на одной линии ряда точек.

Отрезок времени, о котором только что говорилось, 10^{-10} *сек*, очень мал. Представить его себе можно только путем сравнения. У нас есть житейское мерило малого отрезка времени — мгновение ока. Эта «единица» не так-то мала, она равна примерно 0,3 *сек* (время, на которое закрывается глаз при моргании). Так вот: 10^{-10} *сек* во столько же раз меньше «мгновения ока», во сколько раз «мгновение ока» меньше... 30 лет. В равном масштабе времени 10^{-10} *сек* и 30 лет отстоят от «мгновения ока» на одинаковом расстоянии, только одно — в сторону увеличения, а другое — в сторону уменьшения.



Четкость телевизионного изображения принято характеризовать числом строк, на которое оно делится. Это число часто называют стандартом четкости.

В начале 30-х годов у нас было 30-строчное телевидение. В конце 30-х годов, после перехода с механического телевидения на электронное, Ленинград вел передачи с разбивкой изображения на 240 строк, а Москва — на 343 строки. При возобновлении телевизионных передач после Великой Отечественной войны Ленинград применил разбивку на 441 строку, а Москва — на 625

строк. Вскоре разбивка изображения на 625 строк была закреплена как всесоюзный стандарт, обязательный для всех наших телевизионных передатчиков. Этот стандарт четкости — один из самых высоких в мире.

Одно только число строк не характеризует четкость телевизионной передачи. Число строк определяет вертикальную четкость, т. е. количество отдельных элементов, которое может содержать на экране телевизора вертикальная линия; четкость же (или разрешающую способность) по горизонтали — число элементов, которое может содержать строка изображения, зависит от полосы частот, излучаемой передатчиком и воспроизводимой приемником.

У нас принят формат изображения 4×3, т. е. длина изображения больше его высоты в 1,33 раза. Этот формат соответствует стандарту, принятому в кино; он приятен для глаза.

Номинальный размер того растра, который чертит элемент разложения, больше рассматриваемого изображения, так как в конце каждой строки и каждого кадра передаются специальные сигналы, используемые для затемнения обратного хода луча передающей и приемной электронно-лучевых трубок, а также для синхронизации разверток в передатчике и приемнике. Строчный затемняющий импульс длиннее кадрового, вследствие чего номинальный формат растра отличается от фактического формата изображения (формата кадра) и равен приблизительно 1,47.

По вертикали телевизионное изображение разбивается на 625 строк. Если считать, что каждый элемент изображения должен представлять собой квадратик со стороной, равной ширине строки, то число элементов в строке будет:

$$625 \cdot 1{,}47 = 920,$$

а всего изображение будет состоять из $625 \cdot 920 = 580\,000$ элементов. Видно же будет в пределах кадра $575 \cdot 765 = 440\,000$ элементов.

У такого изображения четкость по вертикали и горизонтали будет одинаковой. Определим длительность передачи одного элемента. Для этого нам надо знать, сколько времени уходит на прочерчивание одной строки. По действующему у нас стандарту телевизионное изо-

бражение делится на 625 строк; в секунду передается 25 кадров. Следовательно, в секунду электронный луч прочерчивает

$$25 \cdot 625 = 15\,625 \text{ строк.}$$

Продолжительность прочерчивания одной строки составляет:

$$1 : 15\,625 = 0{,}000064 \text{ } \textit{сек} = 64 \text{ } \textit{мксек}.$$

Следовательно, продолжительность передачи одного элемента изображения равна:

$$64 : 920 = 0{,}07 \text{ } \textit{мксек}.$$

Если один из двух квадратиков изображения, лежащих рядом на строке, белый, а другой — черный, то ток, модулирующий телевизионный передатчик, должен изменяться от минимума до максимума за время передачи двух элементов. Следовательно, частота этого тока должна быть:

$$\frac{1}{2 \cdot 0{,}07 \cdot 10^{-6}} = 7\,000\,000 \text{ } \textit{гц} = 7 \text{ } \textit{Мгц}.$$

А так как излучаемая передатчиком полоса частот определяется высшей модулирующей частотой, то полоса телевизионной передачи должна составлять 7 *Мгц*.

Наши современные телевизоры пропускают полосу частот около 5 *Мгц*. Нетрудно подсчитать, что при такой полосе время передачи одного элемента составит не 0,07 *мксек*, а

$$\frac{10^6}{2 \cdot 5 \cdot 10^8} = 0{,}1 \text{ } \textit{мксек}.$$

При такой длительности передачи одного элемента в строке содержится:

$$\frac{64}{0{,}1} = 640 \text{ элементов.}$$

При этом разрешающая способность по горизонтали будет составлять приблизительно

$$640 : 1{,}47 = 440 \text{ линий.}$$

Это и есть приблизительное число линий, которое определяется по вертикальному клину испытательной телевизионной таблицы, т. е. фактическая четкость изображения по горизонтали. При полном использовании стандарта горизонтальная строка изображения должна состоять из 920 элементов, фактически же при полосе частот 5 *Мгц* она состоит всего из 640 элементов, а все изображение вместо 580 000 элементов состоит из 625 · 640 = 400 000 элементов.

Ниже помещена таблица, в которой приведены приближенные значения четкости по горизонтали и общее число элементов в изображении при различных полосах частот.

Полоса частот, *Мгц*	Разрешающая способность	Число элементов в изображении
3	260	240 000
3,5	310	280 000
4	350	320 000
4,5	400	360 000
5	440	400 000

Из таблицы видно, что если, например, число строк, определенное по вертикальному клину испытательной таблицы, равно 420, то полоса частот, воспроизводимая телевизором, составляет примерно 4,75 *Мгц*.

Таким образом, четкость телевизионных изображений определяется не только числом строк, но и полосой частот. Первое характеризует четкость по вертикали, а вторая — по горизонтали. При данном числе строк четкость по горизонтали тем выше, чем шире полоса частот.

Естественно, что ширина пропускаемой полосы частот зависит не только от телевизора, но и от антенны. Лучшие телевизионные антенны поэтому и называются широкополосными.

ЛАДОНЬ на расстоянии вытянутой руки

Разрешающая способность нашего глаза такова, что при благоприятном освещении глаз различает две черные линии на белом фоне лишь в том случае, если промежуток между ними виден под углом не менее чем в одну минуту.

Из геометрии известно, что под углом в одну минуту виден предмет, удаленный на расстояние, в 3 440 раз превышающее его поперечник. Линейка длиной 1 *м* видна под углом в одну минуту с расстояния 3 440 *м*. Следовательно, чтобы увидеть раздельно две линии на экране, находящемся на расстоянии 3,4 *м*, надо, чтобы расстояние между линиями было не меньше 1 *мм*.

При освещении более или менее сильном, чем оптимальное, разрешающая способность глаза уменьшается. Опыты показывают, что при той освещенности, какую имеет в среднем телевизионный экран, разрешающая способность глаза составляет примерно 1,5 минуты. Из этого следует, что на экране высотой 45 *см*, находящемся на расстоянии 3 *м*, глаз различает примерно 300 горизонтальных линий.

Последние цифры имеют прямое отношение к нашему телевизионному стандарту. Если мы различаем на белом экране 300 горизонтальных линий, то это означает, что на экране нанесено 600 чередующихся черных и белых линий.

Это и есть наш телевизионный стандарт. Этим стандартом предусмотрена развертка изображения на 625 строк, но фактически на экране телевизоров получается несколько меньше строк — примерно около 600. Стандарт установлен, исходя из того, что наш глаз способен разглядеть 600 строк на экране высотой 45 *см* на расстоянии 3 *м*.

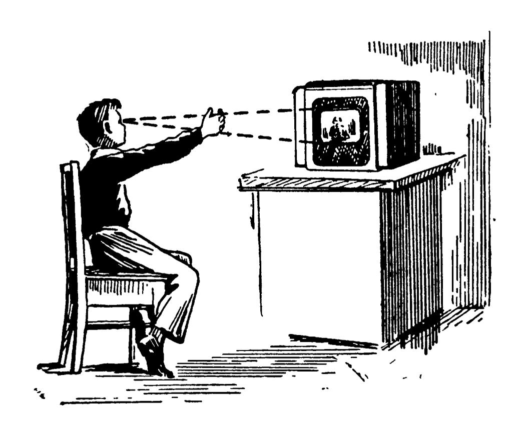
Отношение расстояния от глаза до экрана (3 *м*) к высоте экрана (45 *см*) равно 7. Эта цифра очень важна: она определяет наилучшее расстояние, с которого

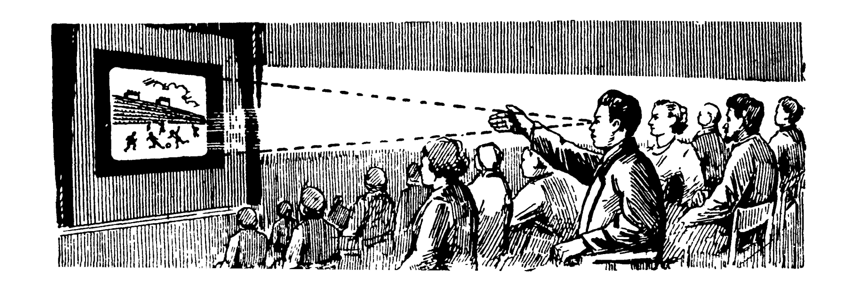
надо смотреть на экран телевизора. Как видно из приведенного расчета, оно равно семикратной высоте экрана. У телевизора «Рекорд» высота экрана 21 *см*, значит на него надо смотреть с расстояния 147 *см*, чтобы обеспечить условия наилучшей видимости. В помещенной далее таблице приведены расстояния наилучшей видимости для распространенных размеров телевизионных экранов.

При большем удалении от экрана нормальный человеческий глаз не сможет разглядеть наиболее мелкие подробности изображения; на более близком расстоянии будет сказываться полосатость изображения, т. е. станут резко видны строки.

Размер экрана, *см*	Расстояние, с которого надо смотреть, *см*	Размер экрана, *см*	Расстояние, с которого надо смотреть, *см*
10×14	70	24×32	170
13×18	90	39×51	280
18×24	130	300×400	2 100

Для того чтобы найти хорошую позицию перед экраном телевизора, нет нужды обязательно вооружаться метром. Очень удобно пользоваться для этого рукой. Расстояние до экрана телевизора будет нормальным в том случае, когда ладонь вытянутой вперед руки примерно полностью закрывает экран. Воспользуйтесь этим приемом и вы убедитесь, что он действительно помогает





легко найти наивыгоднейшее расстояние до экрана. Если Вы пользуетесь телевизором с линзой и экран имеет бо́льшие видимые размеры, чем в приведенной выше таблице, то Вам придется отодвинуться от него дальше. При любом размере экрана наилучшая видимость будет тогда, когда ладонь вытянутой руки примерно совпадет с экраном.

Интересно, что этот прием действителен и в кино. Если сесть в кинотеатре на самые лучшие места — примерно в 14—16-м ряду — и вытянуть перед собой руку, то ладонь как раз закроет экран. Из более близких рядов изображение на экране уже представляется несколько расплывчатым, а из более далеких его видимые размеры уменьшаются настолько, что наиболее мелкие детали изображения уже пропадают. Средние ряды обеспечивают наивысшую четкость и оптимальный размер изображения.

Это, между прочим, показывает ошибочность утверждений, что «в кино видно лучше, чем в телевидении, потому что киноэкран больше». В кино экран действительно больше, чем у телевизоров, но зрители сидят от него гораздо дальше, поэтому видимые размеры киноэкрана и экрана телевизионного примерно одинаковы. Применив упомянутый метод «вытянутой руки», легко убедиться в этом. Телевизионный экран и киноэкран из лучших рядов мы видим под одинаковым углом — около 12° по горизонтали. Но мы знаем, что киноэкран больше, поэтому нам кажется, что его угловые размеры больше. Сказывается здесь также и то, что когда мы смотрим на более близкий телевизионный экран, нам приходится больше сводить оптические оси обоих глаз, чем когда мы смотрим на более удаленный киноэкран,

а по мышечному усилию, нужному для этого, мы бессознательно привыкли оценивать расстояние.

Видно в кино лучше главным образом потому, что там выше четкость. На киноэкране число элементов превышает миллион. Подобная четкость в телевидении еще не достигнута, но нет сомнения, что она будет достигнута в не столь отдаленном будущем.



Прежде всего надо пояснить смысл названия этого очерка. Разумеется, в нем не рассматривается человеческий орган зрения как телевизор. В нем идет рассказ о том, какие параметры должны быть у телевидения для того, чтобы возможности нашего зрения были полностью удовлетворены. Подобные цифры представляют интерес для того, чтобы представить себе, насколько еще можно совершенствовать телевидение с точки зрения четкости.

Нормальный глаз с расстояния, равного семикратной высоте экрана, может рассмотреть на нем не больше 1 500 горизонтальных строк. В такой строке будет:

$$1\,500 \cdot 1{,}33 \approx 2\,000 \text{ элементов.}$$

Общее число элементов в изображении составит:

$$2\,000 \cdot 1\,500 = 3\,000\,000.$$

Длительность передачи одной строки (при 25 кадрах в секунду) будет:

$$\frac{1}{25 \cdot 1\,500} \approx 0{,}00003 \textit{ сек} = 30 \textit{ мксек},$$

а с учетом обратного хода луча (см. стр. 157) 22 *мксек.*

Полоса частот, нужная для такой передачи при условии четкой границы между двумя соседними элементами, составит около 150 *Мгц*.

Таким образом, для полного использования возможностей нашего зрения нужны такие параметры телевидения:

Число строк	1 500
Полоса частот	150 *Мгц*
Видимое число элементов в изображении	3 000 000

Поскольку частота модуляции должна быть по крайней мере в 10 раз меньше несущей частоты передатчика, эта несущая не может быть меньше 1 500 *Мгц*. Такая частота соответствует волне 20 *см*. Следовательно, для передачи телевизионных изображений с размерами, определяемыми углом зрения по горизонтали 12° (угол, соответствующий разглядыванию изображений с расстояния, равного 7—8 высотам экрана), при формате изображения 4×3 и с четкостью, равной разрешающей способности глаза, метровые волны не годятся. Они не могут вместить необходимую для такой передачи полосу частот. Для этого пришлось бы применить наиболее короткие дециметровые волны.

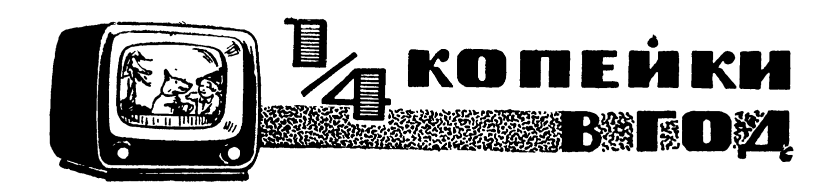
Естественно, что для максимального приближения к «натуре» важны не только «строки» или «точки», но и число градаций — число воспроизводимых переходов от черного к белому. В современном телевидении не рассчитывают больше, чем на десять таких переходов. Шкалы градаций испытательной таблицы разбиты на десять участков, фактически же мы различаем их на экранах телевизоров около восьми. Между тем наш глаз может различить их больше 100. В этом отношении телевидение держит своих зрителей на голодном пайке. Для сравнения можно указать, что в кино (черно-белом) воспроизводится около 30 градаций, а у лучших фильмов и при хорошей аппаратуре — до 50.

Уж раз зашла речь о кино, то надо сказать и об его четкости. Выше было сказано, что на площади телевизионного экрана в оговоренных условиях наш глаз различает до 3 млн. элементов. В кино на соответствующей площади воспроизводится около миллиона элементов. И, конечно, мы все убеждаемся в большей четко-

сти кино, когда после ряда дней пользования телевизором попадаем в кинотеатр. Но телевидение по уровню своей четкости совсем не одиноко. Мы каждый день видим массу изображений такой же четкости, как телевизионные. Это рисунки, напечатанные типографским способом в журналах и газетах. На площади, соответствующей телевизионному экрану, эти рисунки содержат около 350 000 элементов — примерно столько же, сколько телевизионное изображение (в типографском клише около 25 точек на квадратный миллиметр).

Почему наш глаз не может воспринять большее число элементов, чем указано в этом очерке? Это объясняется физическим устройством нашего глаза. Сетчатая оболочка глаза состоит из окончаний зрительного нерва, которые воспринимают световые раздражения и передают их в зрительные центры головного мозга. Для того чтобы мы получили представление о форме и подробностях предмета, надо, чтобы его изображение на сетчатой оболочке покрыло по крайней мере несколько окончаний зрительного нерва. Если изображение предмета ляжет лишь на одно нервное окончание, то мы увидим точку, подробности строения и формы предмета исчезнут.

К этому прибавляется еще дифракционное действие зрачка. Все это приводит к тому, что наш глаз способен рассмотреть лишь те детали, которые он видит под углом около минуты (точная цифра зависит от яркости и других условий). Исходя из этого, можно вычислить, что на экране телевизора изображение должно быть разбито на 1 400—1 500 строк. Такой стандарт будет соответствовать «натуре» — мы будем видеть изображения с такой же четкостью, как и в действительности, считая, конечно, что будут соблюдены все остальные нужные для этого условия: необходимая яркость, достаточное число градаций и пр.



В комнате полумрак. На диване удобно расположились зрители. Перед ними светлый экран телевизора, к которому приковано их внимание.

Такая картина знакома всем. Число телевизоров достигло у нас уже 8 млн., а телезрителей — десятков миллионов. Телевизор становится одним из самых распространенных бытовых электроаппаратов, и это заставляет с ним серьезно считаться. Это относится не только к самим телезрителям, планирующим свой досуг в соответствии с телевизионными программами, но и к администрации клубов, парков и даже... к энергетикам!

Если передача будет интересной, то миллионы людей будут сидеть дома перед своими телевизорами. Телевизор потребляет электроэнергию. Пусть количество нужной для работы телевизора энергии невелико — всего 150—200 *вт*, но телевизоров много. Если включить сразу 5 млн. телевизоров, то на их питание потребуется около 800 000 *квт*. Чтобы снабдить электроэнергией все наши телевизоры, уже теперь должна работать электростанция без малого в 1 млн. *квт*.

Но это только теперь. К концу семилетия число телевизоров увеличится почти в 4 раза. Для снабжения их энергией потребуется несколько крупнейших районных электростанций. Таким образом, энергетики не зря интересуются программами телевизионных передач. Питание телевизоров становится проблемой государственного значения.

Можно ли уменьшить количество электроэнергии, потребляемой телевизором? Хорошо ли телевизор использует ту энергию, которая расходуется на его питание?

Ознакомление с телевизорами показывает, что в этих отношениях работы для конструкторов еще непочатый край. Можно без преувеличения сказать, что масса энергии растрачивается в телевизоре попусту.

Всякое техническое устройство, на работу которого расходуется энергия, характеризуется коэффициентом

полезного действия — к. п. д. Мощный электрический трансформатор имеет к. п. д., близкий к 99%. Только 1% подводимой к трансформатору энергии растрачивается в нем бесполезно, превращаясь в тепло. Это очень высокий к. п. д., который всегда ставится в пример. Ко-

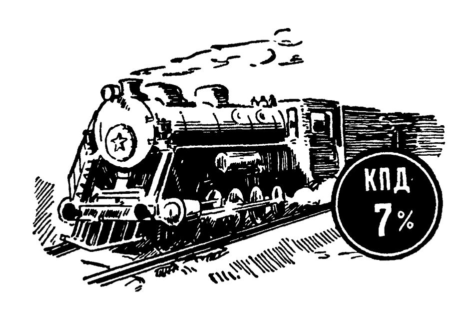


эффициент полезного действия автомобиля — около 25%, паровоза — около 7%. У обычных осветительных ламп к. п. д. низкий — всего около 6%. Люминесцентные лампы расходуют электроэнергию значительно рациональнее, их к. п. д. доходит до 15%.

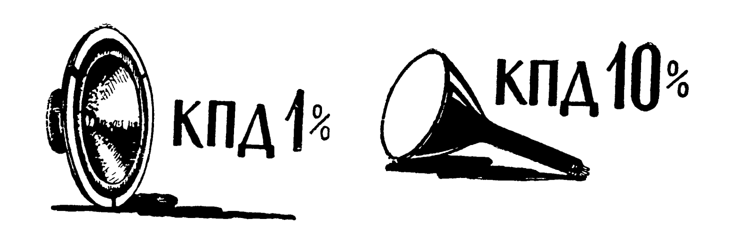
Каков к. п. д. телевизора?

Он исключительно мал.

Предположим, что телевизор потребляет от осветительной сети 170 *вт*. Такую мощность потребляют мно-



гие очень распространенные телевизоры, например: «Рекорд», «Рубин», и др. «Полезной продукцией» телевизора являются изображение на экране и звук, порождаемый его громкоговорителем.

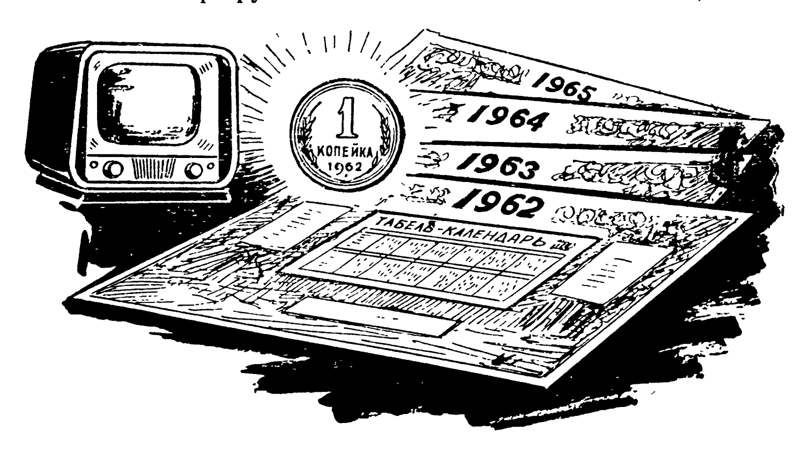


О звуковой части телевизора, являющейся радиоприемником, уже говорилось на стр. 124. Коэффициент полезного действия звукового канала телевизора равен примерно 0,006%.

Может быть, гораздо благополучнее положение с изображением?

Увы, здесь дело тоже обстоит очень плохо. Не так легко установить, какая мощность расходуется на получение изображения, так как она зависит от яркости изображения, от количества в нем светлых и темных мест и др. Но нас интересуют какие-то средние цифры, поэтому примем, что энергия свечения телевизионного экрана равна примерно 0,05 *вт*. Отсюда находим к. п. д. телевизора по изображению — около 0,03%, т. е. почти в 5 раз больше, чем к. п. д. по звуку. Такой сравнительно высокий к. п. д. объясняется тем, что электронно-лучевая трубка превращает в свет почти 10% энергии электронного луча.

Телевизор «Рекорд» потребляет 170 *вт*. Час его работы по тарифу 4 коп. за киловатт-час стоит 0,68 коп.



Будем считать, что телевизор работает по 3 *ч* в день. Тогда суточный расход на его питание составит 2,04 коп., месячный — 61 коп., годовой — 7 р. 34 к.

Сколько же из этой суммы приходится за «полезную продукцию» телевизора при его крайне низком к. п. д.? Буквально гроши! Из 7 р. 34 к. оплата за изображение и звук составит примерно 0,25 коп. Это не ошибка — только двадцать пять сотых копейки. Целый год мы по 3 *ч* ежедневно смотрим телевизионные изображения, слушаем звуковое сопровождение, и стоит это всего-навсего четверть копейки!

А куда же идут остальные деньги, которые мы платим? Положите руку на работающий телевизор — он теплый. Электроэнергия превращается им в тепло. Из общей суммы в 7 р. 34 к. мы только 0,25 коп. платим за полезную продукцию, а остальное — за обогревание комнаты. Когда включаются миллионы телевизоров, то несколько мощных электростанций работают на обогрев наших жилищ!

Эти цифры показывают, насколько важно повышение к. п. д. телевизоров. Есть ли пути к этому? Есть! Можно повысить к. п. д. и громкоговорителя и электронно-лучевой трубки, можно совершенствовать электронные лампы и повышать их экономичность, но основное, что может дать действительно крупный эффект, это замена электронных ламп транзисторами, т. е. полупроводниковыми приборами. Это даст возможность в несколько раз уменьшить энергию, потребляемую телевизорами.



Кто не помнит тот торжественный момент, когда в первый раз включается приобретенный телевизор! Для нового телезрителя нет неинтересных передач. Он смотрит все от начала и до конца.

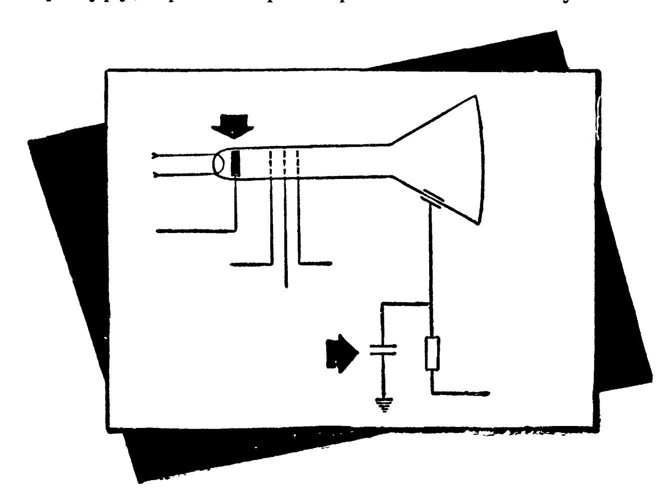
Но вот ведущая передачу с приятной улыбкой пожелала доброй ночи. Уже отзвучал последний аккорд. Владелец телевизора берется за выключатель. Щелчок! И вдруг на экране вспыхивает яркое пятно. Иногда это бывает не пятно, а совсем маленькая блестящая точка, удерживающаяся довольно долго.

Хозяина телевизора охватывает тревога. Не означает ли пятно или точка неисправность телевизора? Не грозит ли это быстрой порчей телевизора? Почему возникает светящееся пятно или точка, когда телевизор выключен? Тысячи писем с такими вопросами летят в радиоконсультации, редакции, телецентры и радиокомитеты.

Чем же объясняется это явление?

Для того чтобы экран светился, надо, чтобы об него с достаточной силой ударялись электроны. Электроны в кинескопе испускает катод, разгоняются они до нужной скорости анодным напряжением. Значит, излучение электронов катодом должно продолжаться и после выключения телевизора и одновременно с этим должно сохраняться и анодное напряжение.

Именно это и происходит в телевизоре. Катод кинескопа подогревный, он обладает большой тепловой инерцией. Остывает он медленно и некоторое время после выключения телевизора продолжает сохранять такую температуру, при которой продолжается излучение элек-



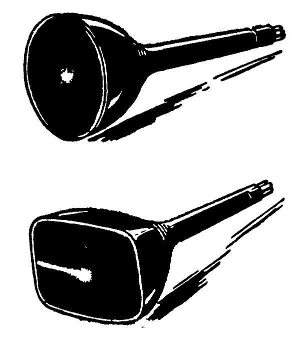
тронов. Кроме того, около катода образуется, как у всех электронных ламп, облачко электронов, за счет рассасывания которого поток электронов поддерживается некоторое время и после прекращения излучения катодом. Поэтому поток электронов в кинескопе не прекращается немедленно после выключения телевизора.

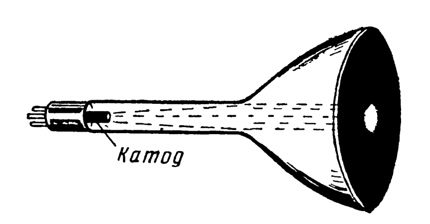
Высокое напряжение подается на трубку через фильтр, содержащий конденсатор. Если изоляция конденсатора хороша, то он сохраняет заряд (как говорят, «держит заряд») некоторое время после того, как высоковольтный выпрямитель перестает работать вследствие выключения телевизора.

Таким образом, какое-то время после выключения телевизора существуют условия, необходимые для свечения экрана: катод излучает электроны, на аноде имеется высокое напряжение. Под его воздействием электроны устремляются к экрану, ударяются об него и заставляют его светиться.

Какая же часть поверхности экрана будет светиться? Это зависит от ряда причин.

В телевизорах старых типов с круглыми электроннолучевыми трубками применялась магнитная фокусировка. Нужное для фокусирования магнитное поле создавалось катушкой, через которую протекал ток. С выключением телевизора ток этот прекращался, фокусирующее магнитное поле переставало существовать. Поэтому излучаемый катодом пучок электронов не фокусировался. Диаметр пучка определялся главным образом диаметром горловины трубки. Ток развертки отсутствовал, поэтому электронный луч, «сформированный» при помощи горловины трубки, ударялся в середину экрана и вызывал появление на нем светящегося пятна диаметром 2—4 *см*. Форма пятна в общем по-





лучалась круглой, но при дефектах катода светящееся пятно могло получиться неправильной формы, иногда рваным.

У прямоугольных электронно-лучевых трубок фокусировка электростатическая. Основные условия возникновения светящегося пятна у этих трубок такие же, как и у круглых трубок, но при хорошей изоляции напряжение фокусировки сохраняется некоторое время после выключения телевизора. Поэтому электронный луч фокусируется и на экране этих трубок возникает не светящееся пятно, как у трубок с круглым экраном, а лишь маленькое яркое пятнышко. Яркость его, естественно, больше яркости светящегося пятна на экране круглых трубок, потому что электроны в этом случае не рассеиваются на поверхности довольно большого пятна, а концентрируются в маленьком пятнышке.

О чем же говорит светящееся пятно или точка на экране телевизора?

Они говорят о том, что катод электронно-лучевой трубки обладает хорошей эмиссией, а изоляция конденсатора фильтра высоковольтного выпрямителя вполне доброкачественна. Таким образом, пятно или точка не есть дефект телевизора, как иногда думают. Наоборот, их появление свидетельствует о хорошем качестве трубки и фильтра высоковольтного выпрямителя.

У светящегося пятна или точки есть еще некоторые особенности, которые вызывают у владельцев телевизоров недоуменные вопросы.

К ним относится, например, такой: почему светящееся пятно держится на экране всего 1—2 *сек*, а точка светится иногда в несколько раз дольше?

Объясняется это просто. Для поддержания свечения большой поверхности пятна нужен электронный луч достаточной интенсивности. Когда он ослабевает больше какого-то предела, свечение прекращается. Но этот же луч, сконцентрированный в точку, вполне достаточен для того, чтобы вызвать свечение очень малой поверхности пятна. Поэтому точка светится дольше пятна.

Вторая особенность часто кажется совсем непонятной: почему светящаяся точка на экране современных прямоугольных трубок иногда появляется не сразу после выключения телевизора, а спустя некоторое время?

Ведь условия, способствующие возникновению точки, наиболее благоприятны именно в первый же момент после выключения телевизора, а в дальнейшем они постепенно исчезают.

Объяснение в этом случае такое: иногда при хороших новых лампах и хороших деталях после выключения телевизора продолжает действовать развертка, которая разбрасывает ослабленный луч по всему экрану, вызвать свечение которого он не может. Но развертка скоро прекращается — главным образом быстро разряжается фильтровой конденсатор сетевого выпрямителя. После этого луч начинает фокусироваться в одну точку и вызывает ее свечение. В тот период времени, когда луч разбрасывается по всему экрану, мы свечения не видим, мы начинаем видеть его только после того, как луч остановится. Внешне это выглядит очень эффектно — телевизор выключен, экран его погас, но вдруг через 1—2 *сек* в его центре возникает ослепительно яркая точка.



В течение многих лет существовал такой хороший и обжитой термин — магнитная звукозапись. Всем он был понятен, все к нему привыкли. И вдруг, как-то сразу, неожиданно выяснилось, что он стал не годен, что пользоваться им по существу нельзя, что данная область техники уже переросла свое название.

Первый удар по магнитной звукозаписи нанесли электронные счетно-решающие устройства. В этих устройствах есть элементы памяти, в которых на длительное или короткое время запечатлеваются нужные сведения, задания, результаты промежуточных вычис-

лений и пр. Для этой цели часто пользуются магнитной записью. Запись производится в кодированном виде, чаще всего цифрами по двоичной системе. Это была магнитная запись, но не звукозапись. Звук из названия исчез.

Далее на сцену выступило телевидение. Было коренные образом усовершенствовано хранение телевизионных передач. До этого сохранить телевизионные передачи можно было только одним способом — заснять их на киноленту. Способ очень хлопотливый. Воспроизведение заснятой киноспособом телевизионной передачи возможно в лучшем случае лишь через несколько часов, а сама технология производства кинофильмов связана с применением сложного оборудования.

Нельзя ли найти более простой способ сохранения телевизионных передач?

Это оказалось возможным. Неожиданную помощь в этом трудном деле оказал магнитофон.

Телевизионный сигнал представляет собой сигнал электрический. Магнитным способом можно записать любой электрический сигнал. Известные пределы здесь кладет лишь частота. Чем выше частота, тем быстрее должна двигаться магнитофонная лента. Это легко понять путем таких рассуждений. Нет сомнения в том, что сигнал может быть записан и воспроизведен лишь в том случае, если за время одного периода частоты сигнала лента сместится на расстояние, значительно превышающее ширину щели магнитофонной головки. А как обстоит дело в этом отношении у современных магнитофонов?

Наибольшей скоростью движения ленты в магнитофонах до последнего времени была скорость 770 *мм/сек*. Если частота записываемых сигналов будет только 1 *Мгц*, то полное изменение тока за один период будет происходить в течение 1 *мксек*. За это время лента успеет сместиться лишь на 0,7 *мк*, тогда как ширина щели бывает порядка 20 *мк*. Таким образом, пока участок ленты, равный по длине ширине щели, пройдет перед щелью, произойдут изменения тока, равные примерно 30 периодам. Записаны они не будут, так как они наложатся друг на друга. А для телевидения применяется гораздо более широкая полоса частот — до 6 *Мгц*.

Поэтому для магнитной записи телевизионных сигналов есть только один способ — резко увеличить скорость

движения магнитной ленты. Если даже допустить, что ширина щели в магнитной головке может быть значительно уменьшена, то все равно скорость движения ленты надо увеличивать в десятки и сотни раз.

Это оказалось возможным сделать, хотя, правда, несколько обходным путем, применив так называемую строчную запись.

Представим себе вал, по окружности которого расположены четыре магнитофонные головки, каждая из которых смещена вниз относительно предыдущей на ширину строки — несколько больше, чем на длину своей щели. Вал вращается, а параллельно его оси, прилегая к валу и образуя своего рода «желобок», движется лента. Этот желобок из ленты охватывает вал с головками не более чем на четверть его окружности.

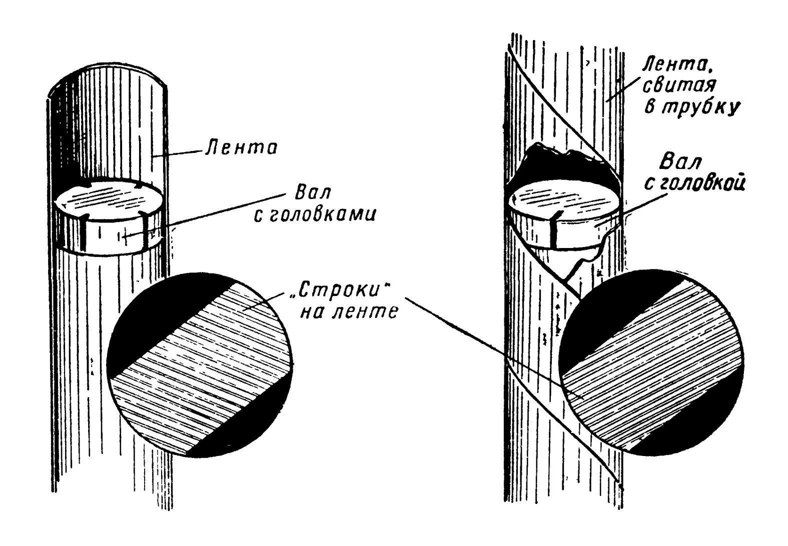
Головки будут как бы прочерчивать на ленте строки. Первую наклонную строку прочертит первая головка. Едва она сойдет с ленты, как на нее с другого края набежит вторая головка и начнет прочерчивать вторую строку. Так как лента движется относительно оси вала, то к моменту подхода второй головки первая строка сместится и вторая строка будет располагаться под нею, считая по движению ленты. Далее будут прочерчены третья и четвертая строки, после чего все начнется сначала, т. е. снова на ленту набежит первая головка и т. д.

Нужны ли для такой записи четыре головки? Конструкторы утверждают, что нужны. Четыре головки обеспечивают непрерывность записи. В тот момент, когда с ленты сходит одна головка, на ленту вступает очередная головка. Придав валу с головками большое число оборотов, можно обеспечить быстрое движение ленты относительно головки (или головки относительно ленты, что одно и то же).

Допустим, что вал делает, например, 15 000 *об/мин*. Следовательно, четверть оборота (сфера действия одной головки) длится 0,001 *сек*. Ширина ленты бывает порядка 50 *мм*. Отсюда нетрудно сосчитать, что скорость движения головки относительно ленты составляет примерно 50 000 *мм/сек*, тогда как в лучших магнитофонах она доходила лишь до 770 *мм/сек*.

Приведенные цифры вполне реальны. В Москве институтом звукозаписи сконструирован магнитофон для

записи телевизионных изображений, данные которого: четыре головки, ширина ленты 50 *мм*, число оборотов вала с головками 15 000 в минуту, скорость движения ленты вдоль вала 385 *мм/сек*. В Ленинграде на заводе «Ленкинап» сконструирован магнитофон с несколько другими данными: ширина ленты 70 *мм*, четыре голов-



ки, число оборотов вала с головками 12 000 в минуту, скорость движения ленты 385 *мм/сек*. Примерно такие же данные имеют и иностранные магнитофоны для записи телевизионных изображений, в том числе и цветных.

Но не все конструкторы использовали четыре головки. Японские конструкторы пошли по другому пути. В сконструированном ими магнитофоне на валу всего одна головка, зато лента охватывает весь вал. Для этого она свита в трубку. Попробуйте свить такую трубку из бумажной ленты и прочертите внутри получившейся трубки карандашом кольцо. Теперь разверните ленту и посмотрите, что у Вас получилось. А получилось вот что: вместо круглого кольца на ленте прочертилась очень длинная наклонная строка. Если начертить два кольца, чуть смещенные друг относительно друга, то

можно убедиться в том, что вторая строка будет без перерыва во времени служить продолжением первой, т. е. будет обеспечена непрерывность записи одной головкой. Вал с головкой в японских магнитофонах для записи изображений делает всего 3 600 *об/мин*, т. е. в 3—4 раза меньше, чем в магнитофонах с четырьмя головками.

Значение записи телевизионных изображений на магнитную ленту гораздо шире, чем это может показаться сначала. Оказывается, например, что производить киносъемку выгоднее не кинокамерой, а телевизионной камерой на магнитную ленту. Такая лента гораздо дешевле; она немедленно без обработки готова к воспроизведению; в случае нужды ленту можно использовать повторно, стерев с нее старую запись; съемку можно вести при гораздо меньшей освещенности, так как чувствительность телевизионных передающих трубок гораздо выше чувствительности кинопленки. Словом, преимуществ очень много, вплоть до того, что и черно-белое и цветное изображения записываются на одну и ту же ленту. Похоже на то, что в будущем кинолента начнет отмирать и будет заменяться магнитной лентой. Эту возможность надо учитывать как одну из вероятных перспектив развития техники магнитной записи сигналов.

Это обстоятельство, как уже, вероятно, заметил наблюдательный читатель, заставило отказаться от названия «магнитная звукозапись» и использовать более общее название — «магнитная запись сигналов», весь запись изображений уже не является звукозаписью! Не являются звукозаписью и некоторые другие виды использования магнитной записи, как, например, запись сигналов в устройствах магнитной памяти счетно-решающих и программных установок.

Так мы являемся свидетелями рождения по существу новой области техники.



Перед нами экран не включенного телевизора. Как можно назвать его окраску или степень его «светлоты»? Ведь его не назовешь черным. Скорее всего скажешь, что это какая-то смесь беловатого, кремоватого, желтоватого и зеленовато-голубоватого оттенков. Обилие слов с окончаниями «ватого» показывает, как трудно охарактеризовать цвет экрана каким-нибудь одним словом.

Как было бы хорошо, если бы экран телевизора был черным! Ведь его окраска определяет черные места изображений. Когда мы включим телевизор, по его экрану побежит электронный луч. Место встречи луча с экраном будет тем ярче, чем светлее должно быть изображение в этом месте. А вот там, где должно быть черное место изображения, экран совсем светиться не будет; мы увидим там экран таким, каким он представляется нам в соответствии с его цветом и яркостью освещения комнаты. Если бы «незажженный» экран был совсем черным, то изображение стало бы контрастнее, его можно было бы лучше смотреть при свете — ведь не всегда удобно и возможно затемнять комнату.

Это требование не только телевидения. Экраны электронно-лучевых трубок стали уже деталями очень многих измерительных приборов и установок. По кривым, возникающим на их экранах, летчик или инженер судит о ходе интересующего его процесса. Но на светлом экране трудно разглядеть даже очень яркую кривую. Вот если бы трубка была черной, как все хорошо выделялось бы на ее экране! Конечно, экран можно снабдить тубусом, но пользоваться им не всегда удобно, в особенности летчикам. Трубка с черным экраном лучше.

Такие трубки с черным экраном начинают делать. Черный экран — не просто черный люминофор. У такой трубки экран полупрозрачен, а вся внутренность трубки

густо чернится. Яркая точка или яркая линия на черном фоне выделяется совершенно отчетливо даже при ярком солнечном освещении.

И пусть прибор с таким экраном имеет мрачноватый вид. Зато качество изображения значительно повышается.

НЕВИДИМОЕ *становится* ВИДИМЫМ

Можно ли видеть невидимое? Не подумайте, что здесь речь идет о том, можно ли обнаружить предмет, находящийся за пределами границ оптической видимости, когда не помогает никакой оптический прибор. Такие предметы, как известно, можно отлично обнаруживать с помощью радиолокации. Мы здесь хотим рассказать о том, как можно увидеть в обычном смысле этого слова то, что в нормальных условиях зрению недоступно. Например, в темноте.

Кроме световых лучей, всякое светящееся тело обычно излучает еще и невидимые инфракрасные лучи. Эти лучи обязаны своим происхождением тепловому движению молекул, существующему во всяком теле, температура которого выше абсолютного нуля. Инфракрасные лучи представляют собой электромагнитные колебания волны, которые по длине находятся между световыми волнами и радиоволнами (длиннее световых и много короче радиоволн) (см. стр. 48). Длина этих волн измеряется величинами от долей микрона до сотен микрон. Волны такой длины уже не воспринимаются органами зрения. Если тело сильно нагрето и находится недалеко от нас, то излучаемые им инфракрасные лучи мы ощущаем в виде тепла, но для удаленных источников тепла

чувствительность нашей кожи недостаточна и их теплового излучения мы не обнаруживаем.

Современная техника позволила создать приборы исключительно высокой чувствительности, которые обнаруживают ничтожнейшие количества тепла. С помощью таких приборов не представляет труда обнаружить тепло, излучаемое окружающими нас предметами, имеющими обычную температуру. Но обнаружить опять-таки не значит увидеть. Нужно еще превратить обнаруженные инфракрасные лучи в обычные световые. И такие приборы тоже есть. С их помощью созданы многие устройства для ночного видения, предназначенные в первую очередь для военных целей, например бинокли, позволяющие видеть в темноте, ночные прицелы к автоматическому стрелковому оружию, позволяющие вести снайперский огонь ночью по «невидимым» целям, и многие другие.

Наиболее интересной частью любого прибора для ночного видения является электронно-оптический преобразователь, в котором обнаруженные инфракрасные лучи превращаются в световые, видимые обычным человеческим глазом.

Вот к чему сводится принцип устройства такого преобразователя: с помощью объектива невидимые инфракрасные лучи, идущие от наблюдаемого объекта, проектируются на специальный фотокатод, чувствительный к этим лучам. Под воздействием принятых инфракрасных лучей такой фотокатод начинает излучать электроны, причем количество их пропорционально интенсивности облучения, т. е. количеству энергии инфракрасных лучей, падающих на данную точку катода. «Яркие», если их так можно назвать (т. е. более нагретые), точки наблюдаемого объекта, от которых инфракрасных лучей приходит больше, создадут и больший вылет электронов, «темные» — меньший.

Излученные фотокатодом электроны ускоряются электрическим полем и направляются далее на флуоресцирующий экран, который вместе с фотокатодом помещается в вакуумной колбе. Бомбардировка экрана электронами вызывает его свечение, которое и воспринимается нашим глазом как видимое изображение. Каждой точке фотокатода соответствует своя точка на экране. Чем больше электронов излучает данная точка

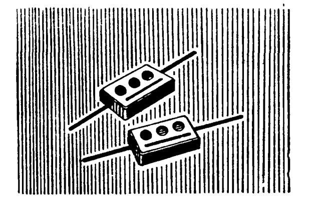
фотокатода, тем ярче будет свечение соответствующей точки флуоресцирующего экрана. Совокупность всех точек дает изображение наблюдаемого объекта.

Чтобы энергия бомбардирующих электронов была велика и вызывала достаточно яркое свечение экрана, между ним и фотокатодом создается высокое напряжение порядка нескольких киловольт. Под действием ускоряющего электрического поля электроны приобретают большую скорость; запасенную энергию они отдают при ударе об экран в виде света.

Инфракрасные лучи в комбинации с различными электронными приборами находят все более широкое применение в технике. Они используются в самых различных случаях, когда нужно обнаружить предметы, температура которых отличается от окружающей.

Можно привести много таких случаев, например, предупреждать столкновение самолетов в воздухе, видеть с самолета в темную ночь изображение местности, т. е. получить ее тепловую карту (так как температура различных участков земной поверхности, зданий, дорог, лесов и т. д. различна), обнаруживать реактивные самолеты (испускающие сильно нагретую струю газов); можно применять эти лучи в устройствах для самонаведения ракетных снарядов на скоростные самолеты-бомбардировщики и использовать их еще для многих целей не только в военном деле, но и в мирной жизни.

В 25 РАЗ ТОНЬШЕ ВОЛОСА



Очень распространенным диэлектриком в конденсаторах постоянной емкости служит слюда — материал, весьма легко расслаивающийся. Толщина листочков слюды в таких конденсаторах измеряется десятыми и даже сотыми долями миллиметра, но тем не менее они продолжают расслаиваться. Интересно, какова же наименьшая достижимая толщина листочков слюды.

Наименьшая толщина листочка слюды, какую пока удалось получить, — около 4 *мк* (0,004 *мм*). Эти листки в 25 раз тоньше человеческого волоса (в среднем 100 *мк*) и даже тоньше паутинной нити, толщина которой около 5 *мк*.

В бумажных конденсаторах в качестве прокладок используется специальная тонкая и прочная конденсаторная бумага. Наиболее тонкие ее сорта имеют толщину 5—6 *мк*, а опытные образцы имеют толщину 3 *мк*.

Еще в четыре раза ТОНЬШЕ



Сверхтонкие листки, которые можно получить расщеплением слюды, кажутся, однако, достаточно толстыми по сравнению с другим материалом, применяемым в одном из разделов радиотехники — пьезотехнике.

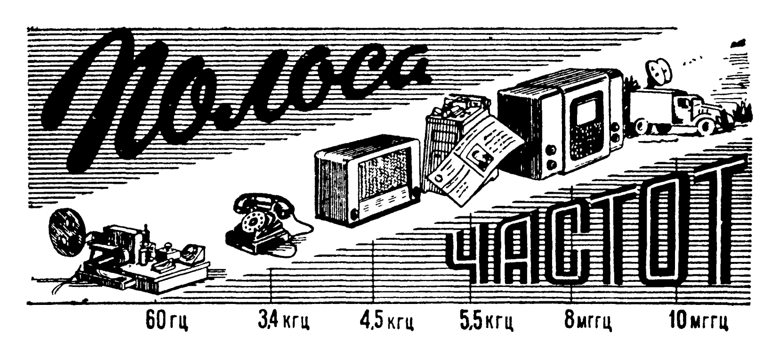
Как известно, пьезоэлементы, являющиеся основной частью пьезоэлектрических телефонных трубок, звукоснимателей и микрофонов, должны быть покрыты с двух сторон проводящим слоем. В качестве такого слоя применяется сусальное серебро — серебряная фольга тол-

щиной около 1 *мк*. Листик такой фольги, будучи брошен, опускается очень медленно. Он как бы плавает в воздухе.

Один микрон представляет собой меру, уже сопоставимую с длиной видимых световых лучей. Наш глаз реагирует на электромагнитные колебания с длиной волны, начиная с 0,76 *мк*.

Интересно, что искусством изготовления сусального золота и серебра русские умельцы овладели очень давно. Столь тонкие листки металла требовались для золочения и серебрения, и русские мастера изготовляли их вручную, выбивая деревянными молоточками на натянутой свиной коже.

Необычайно тонок слой металлизации, наносимый на восковые пластинки при грамзаписи. Так, при металлизации восковок методом катодного распыления в вакууме металлическое покрытие имеет толщину всего 0,003 *мк*, что равно длине волны рентгеновых лучей.



В технике связи, звукозаписи, акустике принято характеризовать источники звуков, а также каналы и аппаратуру, служащие для их передачи и воспроизведения, полосой частот. Под полосой частот понимаются те пределы, между которыми лежат частоты источника звуков, или те пределы частот, которые данным устройством могут быть пропущены и воспроизведены.

Общеизвестно, что техника связи и звукозаписи в настоящее время не имеет еще возможности оперировать

такими полосами частот, какие требуются для полной естественности звучания. Например, для хорошего воспроизведения человеческого голоса нужна полоса частот по крайней мере 12 000—15 000 *гц*, а радиовещательные станции по ряду причин обычно могут использовать полосу лишь 4 500 *гц*. В связи с этим интересно познакомиться с тем, каковы те полосы частот, которые в настоящее время используются различными видами связи.

Род передачи	Используется полоса частот, *гц*
Ручной телеграф	60
Быстродействующий телеграф	1 200
Телефон (разговор)	3 400
Радиовещание с амплитудной модуляцией . .	4 500
Фототелеграф	5 500
Трехканальная аппаратура связи	30 000
Радиовещание с частотной модуляцией и обычной величиной девиации	75 000
12-канальная аппаратура связи	150 000
Телевидение	8 000 000
Радиолокация	10 000 000

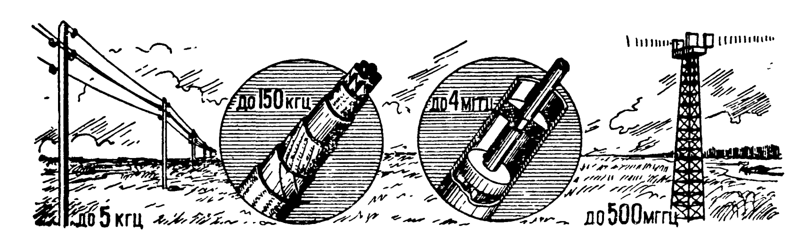
Из перечисленной в таблице аппаратуры радиолюбителям наименее известна многоканальная аппаратура. Это высокочастотная аппаратура проводной связи, в широкой полосе частот которой выделено несколько более узких полос, каждая из которых включает несущую частоту («поднесущую»), модулированную своей звуковой частотой, и может быть применена для передачи. Например, трехканальная аппаратура имеет три таких канала со своими поднесущими частотами. Каждый из каналов может быть использован для одного двустороннего телефонного разговора или 18 телеграфных передач. Следовательно, по трехканальной аппаратуре могут быть одновременно переданы, например, два телефонных разговора и 18 телеграфных передач, не считая одного обычного телефонного разговора, который может производиться по тем же проводам на звуковой частоте.

В помещенной ниже таблице приведены полосы частот, которые могут пропускаться современными каналами проводной связи и специальными радиоканалами.

Канал связи	Ширина полосы частот, *кгц*
Обычная междугородная проводная линия (без дополнительных устройств)	5
Высокочастотный кабель	150
Специальный междугородный коаксиальный кабель	4 000
Радиорелейная линия (на сантиметровых волнах)	500 000
Волноводные линии связи на миллиметровых волнах	до $40 \cdot 10^6$

Как видно из этой небольшой таблицы, частотная пропускная способность обычной проводной линии очень мала. Высокочастотные кабели пропускают такую полосу частот, что по ним можно одновременно производить передачу радиовещательной программы, фототелеграфа и очень большого числа телефонных разговоров и телеграфных сообщений. Специальный высокочастотный коаксиальный кабель может быть использован даже для телевизионных передач. Рекорд ширины полосы побивают радиорелейные линии. По радиорелейной линии можно одновременно пропускать не только телевизионные передачи с полной четкостью, но и большое количество радио- и фотопередач, телефонных разговоров и пр. Этим и объясняется то особое внимание, которое уделяется теперь развитию радиорелейных линий связи.

Конечно, они не лишены и недостатков. К ним относится трудность налаживания линий с большим количеством приемо-передающих звеньев, трудность обеспечения надежности работы и др. Но все же радиорелейные линии прокладываются, и благодаря им мы уже связаны с телевизионной сетью Европы. На очереди освоение волноводных линий.



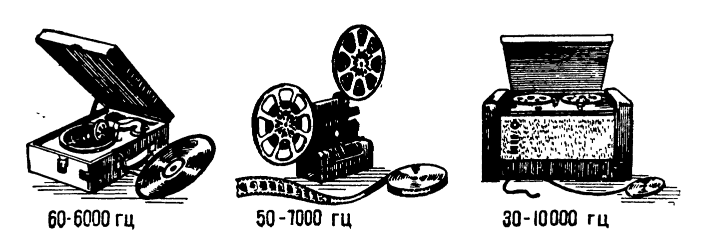
Радиовещательные передачи на длинных и средних волнах ограничены полосой 4 500 *гц*. Такая сравнительно узкая полоса определяется, в частности, необходимостью размещения в этих диапазонах возможно большего числа передающих станций, которые могли бы работать без взаимных помех. На коротких волнах, охватывающих значительно больший частотный диапазон, станции могут быть размещены «свободнее», поэтому они используют более широкую полосу частот — до 5—6 *кгц*, и их передачи звучат естественнее, «сочнее», чем на длинных и средних волнах. Еще «свободнее» на ультракоротких волнах, в особенности при частотной модуляции, где может быть передана полностью вся полоса слышимых частот с естественной градацией громкости.

Какова же полоса частот звукозаписывающих устройств? Эти данные по основным видам звукозаписи приведены в таблице.

Вид звукозаписи	Полоса записываемых частот, *гц*
Механическая запись (граммофонная пластинка)	60— 6 000
Оптическая запись (кинолента)	50— 7 000
Магнитная запись (ферромагнитная лента)	30—10 000

Наиболее широкая полоса частот может быть записана магнитным способом. Хорошие современные магнитофоны практически записывают почти целиком всю полосу частот, обеспечивающую очень хорошее восприятие.

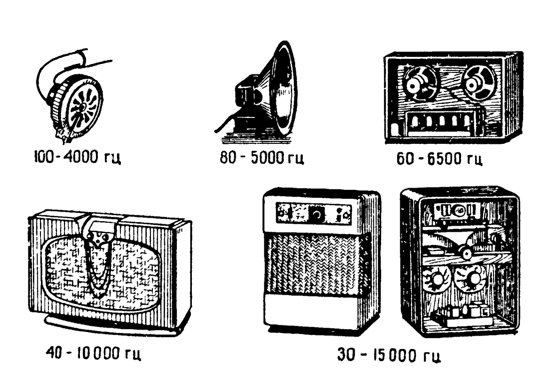
Какова же полоса частот, пропускаемых современными воспроизводящими устройствами? Ведь именно они определяют качество звучания. Как бы ни были



хороши качества микрофонов, передатчиков, линий, усилителей, граммофонных пластинок, ферромагнитных лент и т. п., наше ухо воспримет лишь то, что воспроизведет последнее звено цепочки — звуковоспроизводящее устройство. Этими воспроизводящими устройствами являются в настоящее время механические звуковоспроизводители граммофонов и электродинамические громкоговорители, применяемые для воспроизведения оптической и магнитной звукозаписи и радиопередач. В следующей таблице приведены данные о полосе частот, воспроизводимой этими устройствами.

Звуковоспроизводящее устройство	Полоса воспроизводимых частот, *гц*
Механическое (мембрана — рупор граммофона)	100— 4 000
Хороший электродинамический громкоговоритель	80— 5 000
Агрегат из двух громкоговорителей (соответствующий радиоле 1-го класса)	50— 6 500
Агрегат из нескольких громкоговорителей высокого класса (лучшие радиолы и киноустановки)	40—12 000
Наилучшие агрегаты из нескольких громкоговорителей высшего качества (контрольные установки)	30—15 000

Эта таблица поясняет, почему воспроизведение грампластинок электрическим способом превосходит по качеству акустическое воспроизведение: граммофон не в состоянии передать такую полосу, какая записана на грампластинке, тогда как хорошие электрические



громкоговорящие установки воспроизводят ее полностью. Вообще же лучшие агрегаты громкоговорителей воспроизводят более широкую полосу, чем та, которая может быть любым способом записана. Техника воспроизведения в настоящее время обогнала технику записи.

$F_{несущ.} \geq 10 F_{модуляц.}$

Полоса частот и частота передачи

На стр. 197 указаны полосы частот, необходимые для передач различных видов. Разница в ширине этих полос огромна: от нескольких десятков герц, нужных для ручной телеграфной передачи, до нескольких мегагерц, требующихся для телевидения.

Ширина полосы частот тесно связана с частотой передатчика, который будет вести эту передачу.

Предположим, что мы подбираем частоту для радиовещательного передатчика с амплитудной модуляцией. Свободны ли мы в этом выборе, можем ли мы остановиться на любой понравившейся нам частоте, например на частоте, соответствующей волне 10 000 *м*?

Нет, не можем. Между частотой передатчика и шириной полосы передаваемых частот существует зависимость: обычно считается, что ширина полосы передаваемых частот не должна превышать примерно 10% несущей частоты передатчика. Полоса частот радиовещательной передачи должна составлять 4 500 *гц*, т. е. 4,5 *кгц*. Поэтому для радиовещательной передачи с амплитудной модуляцией нужна несущая частота не менее 45 *кгц*, т. е. волна не длиннее 6 600 *м*, а для телефонной передачи, для которой требуется полоса 3,4 *кгц*, нужен передатчик, работающий на волне не длиннее 8,800 *м*. Радиовещательные передачи на волнах длиннее 6 600 *м* и телефонные на волнах длиннее 8 800 *м* будут сопровождаться искажениями, тем бо́льшими, чем значительнее длина волны превышает указанные предельные значения.

В следующей ниже таблице приведены некоторые длины волн и соответствующие им крайние значения возможной для передачи полосы частот.

Длина волны, *м*	Частота, *кгц*	Наибольшая ширина полосы частот, возможной для передачи, *кгц*
20 000	15	1,5
2 000	150	15
200	1 500	150
20	15 000	1 500
2	150 000	15 000

Из этой таблицы видно, что волны длиннее 10 000 *м* пригодны только для телеграфной передачи. Фототелеграфная передача может производиться на волнах примерно такой же длины, как и радиовещательные передачи с амплитудной модуляцией, и т. д. Для телевизионных передач пригодны лишь очень короткие волны — короче 10 *м*. Фактически для телевидения используются волны порядка 0,5—7 *м*.



При поверхностном рассмотрении этот вопрос может показаться бессмысленным. Но ...

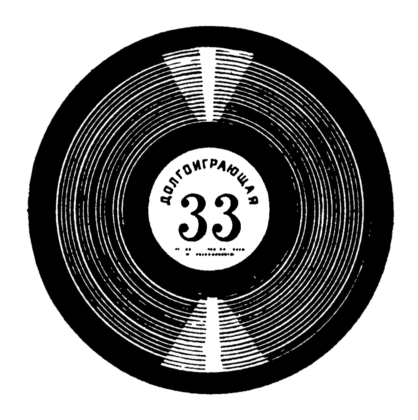
На пластинке обычных размеров (диаметром 25 *см*) наименьший радиус бороздок бывает около 6 *см*, наибольший — примерно 12 *см*. Средний радиус бороздок равен, следовательно, 9 *см*, а средняя длина витка бороздки составляет около 54 *см*.

На 1 *см* радиуса пластинки укладывается в среднем 37 бороздок. На 6 *см* (разность между наибольшим и наименьшим радиусами) уложатся 222 витка, а так как средняя длина витка равна 54 *см*, то общая длина всей звуковой бороздки составит примерно 120 *м*.

Какова же скорость движения звукоснимателя? Она подсчитывается просто. Проигрывание пластинки длится около 3 *мин*, а длина бороздки, как мы только что видели, составляет 120 *м*. Следовательно, скорость движения звукоснимателя в круглых цифрах равна 2,5 *км* в час — это скорость пешехода, идущего медленным шагом. Но следует учесть, что эта скорость является средней. В начале пластинки, где скорость наибольшая, она равна примерно 3,4 *км/ч*, а в конце, где радиус витка мал, она снижается до 1,7 *км/ч*. Заметим кстати, что среднее время проигрывания одного витка бороздки составляет 0,77 *сек*.

В этом подсчете не было принято во внимание, что бороздка граммофонной пластинки в соответствии с частотой и громкостью записанного на ней звука имеет извилины. Мы произвели подсчет длины немодулированной бороздки. Извилины увеличивают длину бороздки в 3—5 раз, т. е. фактическая длина бороздки может доходить до 600 *м*. Кончик иглы звукоснимателя следует





по всем извилинам бороздки, и за тот же отрезок времени, в течение которого звукосниматель пробежит 120 *м*, игла — вернее, ее кончик — проделает путь в полкилометра. Полкилометра за 3 *мин* — средняя скорость 10 *км/ч*. Чтобы не отстать от звукоснимателя, нам достаточно идти медленным прогулочным шагом. Но если мы захотим поспеть за кончиком иглы этого звукоснимателя, нам придется довольно быстро бежать.

Заметим кстати, что работа звукоснимателя основана именно на том, что игла следует по извилинам бороздки, а сам звукосниматель движется по правильной спирали. При несоблюдении этого условия звукосниматель не мог бы работать.

Приведенный подсчет был сделан нами для пластинки, предназначенной для проигрывания со скоростью 78 *об/мин.* Теперь выпускаются также долгоиграющие пластинки, которые проигрываются со скоростью 33$^1/_3$ *об/мин* при примерно 100 витках на сантиметр радиуса пластинки. Продолжительность проигрывания такой пластинки (обычных размеров) 15 *мин.* Число витков доходит до 600 при общей длине немодулированной бороздки около 330 *м.* Продолжительность проигрывания витка 1,8 *сек.* Средняя скорость звукоснимателя 1,1 *км/ч,* наибольшая — 1,5 *км/ч,* наименьшая — 0,75 *км/ч.*

Извилины борозки у долгоиграющей пластинки меньше, чем у обычной; длина модулированной бороздки превышает длину немодулированной примерно в 2 раза, составляя, следовательно, около 650—700 *м.*

Рекорд по длине борозки побивают долгоиграющие пластинки увеличенного формата. Длина их немодулированной бороздки составляет около 1 *км,* а модулированной — до 2 *км.*



С момента, когда А. С. Попов впервые применил свой детектор для обнаружения электромагнитных волн, прошло почти 65 лет. С тех пор детектор, как и все прочие элементы радиоприемника, непрерывно подвергался усовершенствованиям, но до сего времени он продолжает оставаться обязательной частью каждого радиоприемника.

Небезынтересно проследить за изменениями, которые детектор претерпел за это время.

В приемнике А. С. Попова детектором служила трубочка, наполненная мелкими металлическими опилками, — когерер. Под действием электромагнитных колебаний сопротивление промежутка, заполненного опилками, резко уменьшалось, и это обстоятельство А. С. Попов использовал для обнаружения электромагнитных волн в окружающем пространстве.

Когерер имеет очень малую чувствительность. Он не мог найти широкого применения и вскоре был заменен детектором, состоявшим вначале из пары уголь — сталь (А. С. Попов, 1901 г.), а потом из кристалла какого-либо минерала и прикасающегося к нему металлического острия. Работа детектора основывалась на свойстве такой пары хорошо проводить ток в одном направлении и почти не проводить его в обратном.

Крупнейшим недостатком кристаллических детекторов, широко применявшихся вплоть до второй мировой войны, являлась неустойчивость их работы. Односторонней проводимостью обладает не вся поверхность кристалла, а лишь отдельные ее точки. Найти чувствительную точку было нелегко, а найдя ее, приходилось всячески оберегать детектор от толчков и сотрясений, так как малейшего сдвига острия с чувствительной точки было достаточно для того, чтобы детектор перестал работать.

Появление электронной лампы, казалось, решило проблему детектирования. Диод проводит только в одном направлении, т. е. является хорошим детектором. Работает диод устойчиво, не боится сотрясений.

Однако диод оказался менее чувствительным к слабым сигналам, чем кристаллический детектор. Кроме того, для питания нити накала нужно иметь батарею или другой источник. Все это привело к тому, что кристаллический детектор так и не был вытеснен диодом из радиоприемников того времени.

Переворот в технике радиоприема, вызванный появлением трехэлектродной лампы с ее огромным усилением, привел также к усовершенствованию детектора. В ламповых приемниках начали применять только ламповые триодные детекторы, полностью вытеснившие кристаллические. Наибольшее распространение получил сеточный детектор, отличающийся большой чувствительностью и обладающий способностью детектировать очень слабые сигналы. Преимуществом сеточного детек-

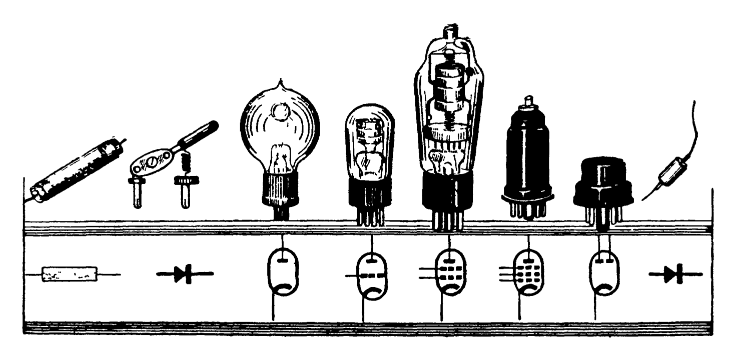
тора перед кристаллическим было то, что первый одновременно усиливал сигналы, тогда как второй никакого усиления не давал. Благодаря этим своим достоинствам сеточный детектор на долгие годы занял почти монопольное положение в ламповых приемниках.

От детектора в то время требовалась главным образом высокая чувствительность.

После перехода к супергетеродинным схемам требование высокой чувствительности детектора потеряло свою остроту, так как усиление слабых высокочастотных колебаний до детектора не представляло затруднений. На первый план выдвинулось требование минимальных искажений. Как раз с этой стороны сеточный детектор оказался наименее удовлетворительным — он заметно искажал.

Несколько лучшие результаты в этом отношении давал анодный детектор, однако наименьшие искажения, как показали исследования, обеспечивал простой диодный детектор. Этот детектор прочно вошел в практику и в течение всех последних лет являлся практически единственным типом детектора в супергетеродинных приемниках. Диодный детектор особенно хорошо детектирует сигналы с относительно большой амплитудой и при правильно выбранных элементах схемы практически не вносит искажений.

По мере перехода к более высоким частотам элементы схемы супергетеродинного приемника изменяли, приспосабливая их к новым условиям. Неизменным оставался лишь детектор — диод отлично справлялся со своими задачами. Мало того, на дециметровых волнах область применения детектора расширилась: диод заменил сложные многоэлектродные лампы; он оказался наиболее удачным смесителем в супергетеродине для дециметрового диапазона. Однако дальнейшее повышение рабочих частот серьезно поколебало безупречную репутацию диода: на сантиметровых волнах он уже не мог работать. Емкость между анодом и катодом, которая у обычных диодов достигает 3—4 *пф*, оказалась для этих частот чрезмерно большой; она шунтирует диод и создает обходный путь для высокочастотных колебаний, так как ее сопротивление для них ничтожно мало. Например, для волн длиной 10 *см* оно составляет всего около 13 *ом*.



Тут пришлось опять вспомнить о кристаллическом детекторе, который после небольших конструктивных переделок оказался вполне пригодным для работы на сверхвысоких частотах. Он обладает ничтожной емкостью, так как площадь соприкосновения острия с кристаллом измеряется долями микрона.

Современные кристаллические детекторы для сверхвысоких частот свободны от основного недостатка, о котором говорилось вначале, — неустойчивости «точки», а емкость их сведена всего к 0,1—0,2 *пф*. Их конструкция обеспечивает надежную работу. В качестве материала для кристалла используется кремний, а для острия — тонкая вольфрамовая проволочка. Еще лучшие результаты дают германиевые детекторы, получившие распространение в последние годы; у них проволочное острие можно иногда даже приварить к поверхности кристалла.

Кристаллические детекторы находят применение в радиолокационных и телевизионных приемниках. Широко применяются они и в радиоизмерительной аппаратуре для измерений на высоких частотах.

Таким образом, за 50 с лишним лет своего существования детектор проделал интересный путь развития: кристаллический детектор — диод — триод — многоэлектродная лампа — диод — кристаллический детектор. Значит ли это, что круг замкнулся и радиотехника вернулась назад? Ни в коем случае. Она не вернулась к исходной точке — старому детектору. Хотя в кристаллическом детекторе наших дней используется тот же принцип, что и в первом детекторе, но техническое выполнение детектора стоит на несравненно более высоком уровне. Устойчивость и надежность работы этого детектора не идут ни в какое сравнение с этими качествами кристаллического детектора первых дней радиотехники.



Можно ли подсчитать, сколько миллионов часов потратили радисты и радиолюбители всего мира на поиски чувствительной «точки» у кристаллического детектора!

Лишь в самое последнее время радиолюбители получили детекторы с постоянной точкой, которые освободили владельцев детекторных приемников от утомительной необходимости прощупывать спиралькой кристалл.

Что же это за удивительная «точка»?

Больше 40 лет хранил кристаллический детектор тайну своей «точки». В разное время создавались различные гипотезы с целью объяснить физику работы кристаллического детектора. Была распространена, например, «дуговая» гипотеза, согласно которой работа детектора объяснялась возникновением в месте контакта острия спиральки с кристаллом микроскопических электрических дуг. Потом появилась «контактная» гипотеза, по которой односторонняя проводимость детектора определялась контактной разностью потенциалов.

Однако «контактную» гипотезу постигла такая же участь, как и «дуговую».

«Тайна» кристаллического детектора начала раскрываться лишь в последние предвоенные годы. Детектирующее действие кристалла оказалось следствием особенностей проводимости полупроводников.

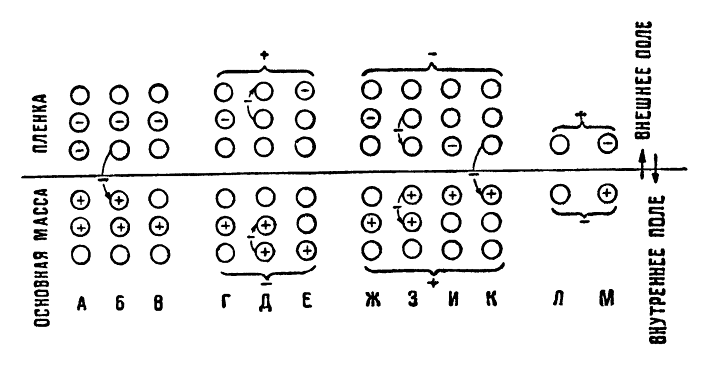
На стр. 32 уже рассказывалось о существовании у полупроводников двух видов проводимости: электронной и дырочной. Детектирующие кристаллы обладают той особенностью, что на их поверхности образуется пленка, обладающая иной проводимостью, чем сам кристалл. Если, например, кристалл обладает дырочной проводимостью, то его поверхностная пленка имеет электронную проводимость, и наоборот. Граница соприкосновения поверхностной пленки с телом кристалла образует особую зону, называемую запирающим слоем и имеющую толщину всего в десятитысячные доли миллиметра.

Предположим, что имеется кристалл, у которого проводимость основной массы — дырочная, а поверхностной пленки — электронная, т. е. в основной массе полупроводника есть какое-то количество примесных атомов легко расстающихся с одним из своих электронов, а в поверхностной пленке есть примесные атомы, легко захватывающие лишние элементы.

Проследим в самых общих чертах электрические процессы, которые произойдут в зоне соприкосновения поверхностной пленки с телом полупроводника. Для лучшей наглядности на рисунке показаны тонкие «столбики» атомов, расположенные в пленке и теле кристалла перпендикулярно поверхности пленки.

Столбик (*А*) характеризует начальный момент соприкосновения пленки с телом. Атом с избыточным электроном, входящий в состав пленки, оказался рядом с атомом основного тела полупроводника, лишенным электрона, т. е. оказался рядом с «дыркой». Электрическое поле, которое будет существовать между этими двумя атомами, заставит электрон перейти от отрицательного атома к положительному (*Б*). В результате соприкасающиеся атомы станут нейтральными, в зоне соприкосновения зарядов не станет и образуется запирающий слой (*В*).

Если к кристаллу подвести напряжение плюсом к пленке и минусом к массе (*Г*), то внутри кристалла возникнет электрическое поле, показанное на рисунке стрелками (*Д*). Это поле перемещает электроны в направлении стрелок. Под влиянием этого поля более удаленные от запорного слоя атомы пленки, имеющие



избыточные электроны, передадут их еще более удаленным атомам, а примесные «дырки» в теле кристалла заполнятся электронами, отданными атомами, более удаленными от запорного слоя. В результате запорный слой станет толще (*Е*) и сопротивление его возрастет. При такой полярности приложенного напряжения кристалл не будет проводить тока.

При наложении напряжения обратной полярности картина изменится (*Ж*). Электроны начнут двигаться в обратном направлении (*З*, *И* и *К*). Запорный слой станет утончаться и может совсем исчезнуть. Таким образом, кристалл будет обладать односторонней проводимостью.

При подобных рассуждениях обычно возникает сомнение: почему при условиях, показанных в столбике (*Г*), не происходит обмена электронами между соприкасающимися атомами пленки и тела кристалла? С нижней стороны линии раздела в этом случае находится примесный атом, который легко расстается с электроном, а с верхней стороны — примесный атом, который охотно принимает лишний электрон, что же касается приложенного к кристаллу электрического поля, то оно способствует такому переходу электрона (*Л*). Однако при таких рассуждениях не следует забывать, что если переход электрона действительно произойдет (*Л* и *М*), то между этими двумя атомами сейчас же возникнет поле, стремящееся возвратить электрон в исходное положение.

В итоге на электрон будут действовать два поля: внешнее, стремящееся удержать перешедший электрон, и «внутреннее», стремящееся вернуть электрон. Обычно «внутреннее» поле бывает сильнее, потому что атомы находятся очень близко один от другого. Но может случиться, что внешнее поле «пересилит» и подобный перенос электронов действительно начнется. Это будет означать, что запорный слой «пробит» — кристалл попал под пробивное напряжение. Выпрямляющая «точка» перестанет существовать, и придется искать новую.

Таким образом, сопротивление кристалла зависит от полярности приложенного к нему напряжения: в одном направлении оно больше (запирающий слой становится толще), а в другом — меньше (запирающий слой делается тоньше и даже совсем исчезает). Благодаря та-

кой односторонней проводимости кристалл детектирует.

Поверхностная пленка на кристалле в разных местах неодинакова. Ее характер зависит от многих причин и в особенности от примесей посторонних веществ. Поэтому «точку» приходилось искать. Естественно, чем меньше площадь соприкосновения спиральки с кристаллом, тем больше шансов, что удастся нащупать поверхность с однородной пленкой. Поэтому острие спиральки надо было хорошо затачивать: площадь контакта должна быть порядка десятых долей микрона. Слишком сильный нажим острия мог повредить пленку. Поэтому контактирующую с кристаллом проволочку приходилось закручивать в спираль — она ограничивала возможность сильного нажима. Под воздействием сильных электрических импульсов, например от интенсивности атмосферных разрядов, пленка разрушалась и «точка» «сбивалась». Поэтому найденная «точка» не сохранялась надолго.

Лишь в последние годы, когда физика работы кристалла была выяснена, научились делать кристаллы с прочной однородной поверхностной пленкой и обеспечивать наилучший контакт с работающими в паре с ними проводничками.

Современные кремниевые и германиевые детекторы обладают очень большой чувствительностью и весьма постоянной «точкой». Кристаллические детекторы, неразрывно связанные в наших воспоминаниях с простейшим детекторным приемником, успешно работают теперь в сложнейшей радиоаппаратуре — телевизионной и радиолокационной.



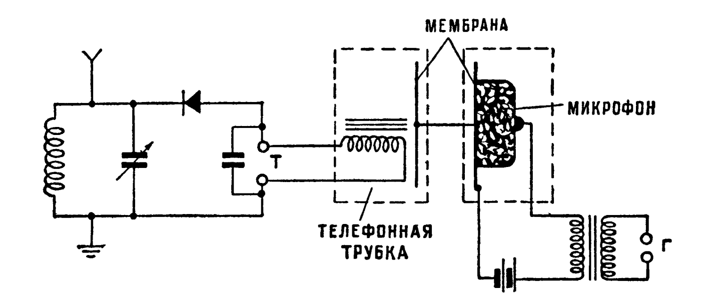
Электронную лампу недаром называют чудесной лампой. Она уже дала возможность человеку осуществить многое из того, о чем он на протяжении долгих тысячелетий мог лишь мечтать.

Своими успехами и победами электронная лампа обязана тому, что ее работа основана на использовании электронов, с огромными скоростями несущихся в пространстве внутри лампы и почти мгновенно подчиняющихся велениям управляющих электродов.

Может ли другое устройство конкурировать с электронной лампой?

Оказывается, может.

Электронная лампа знала конкурентов в прошлом. У нее есть очень серьезные конкуренты и в настоящем.



Первым пытался соперничать с электронной лампой так называемый микрофонный усилитель.

Основной частью усилителя являются телефонная трубка и угольный микрофон, мембраны которых жестко соединены между собой. При подведении к обмотке телефона переменного напряжения в цепи микрофона за счет энергии батарейки можно получить несколько усиленное напряжение.

Такие усилители потребляют очень большой ток — примерно четверть ампера, но основным их недостатком являются большие искажения. Ограниченное практическое применение они в прошлом нашли лишь в слуховых аппаратах, предназначенных для тугоухих. Главнейшими требованиями, предъявляемыми к слуховым аппаратам, были легкость и компактность. Искажения не играют особо большой роли, лишь бы было разборчиво.

Первоначально электронным лампам было трудно конкурировать в слуховых аппаратах с микрофонными усилителями из-за больших размеров самих ламп и их малой экономичности. Однако лампы новейших типов,

в частности пальчиковые и сверхминиатюрные, а затем и транзисторы, дали возможность сконструировать весьма компактные, легкие и экономичные слуховые аппараты, позволяющие получить большое усиление при высокой естественности воспроизведения. Поэтому в слуховых аппаратах микрофонные усилители больше не применяются. Попытки использовать их в качестве усилителей для детекторных приемников не увенчались успехом по ряду причин, из которых главнейшими являются опять-таки значительные искажения и большое потребление тока.

Вторым конкурентом электронной лампы был цинкитный кристаллический детектор, который в результате разработанной сотрудником Нижегородской радиолаборатории О. В. Лосевым специальной обработки и при найденных им условиях работы мог генерировать и давать известное усиление.

Лосевым был сконструирован приемник с таким детектором — кристадин, значительно более чувствительный, чем обычный детекторный. Кристадины получили некоторое распространение, но были вытеснены электронной лампой, работавшей гораздо более устойчиво и дававшей большее усиление.

Таким образом, в прошлом электронной лампе удалось довольно легко справиться со своими конкурентами.

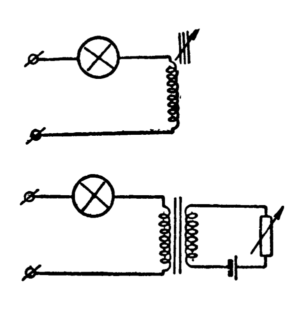
Несравненно более тяжелую борьбу приходится вести электронной лампе с конкурентами в наши дни.

В ряде областей применения с электронной лампой успешно соперничают магнитные усилители.

Принцип действия магнитных усилителей состоит в следующем. Известно, что величина сопротивления катушки переменному току зависит от ее индуктивности. У катушек с сердечником индуктивность зависит от магнитной проницаемости сердечника. Мы можем, например, включить осветительную лампу в сеть переменного тока через катушку. Пока у катушки не будет сердечника, лампа будет гореть ярко. Если начать вдвигать в катушку сердечник, то сопротивление катушки станет возрастать и яркость накала лампы будет уменьшаться. Чем больше вдвинут сердечник и чем выше его магнитная проницаемость, тем слабее будет накал лампы.

Величину магнитной проницаемости можно изменять подмагничиванием сердечника постоянным током. Если

в нашем опыте на сердечник катушки намотать дополнительную обмотку и пропустить по ней постоянной ток, то изменением величины этого тока можно будет регулировать степень накала лампы. При отсутствии в дополнительной обмотке постоянного тока накал лампы будет наименьшим.



Подмагничивая сердечник постоянным током, можно изменять величину переменного тока во вторичной обмотке, намотанной на этом сердечнике. При этом замечательно, что очень малые изменения переменного тока в другой обмотке вызывают значительные изменения тока в первичной обмотке. Подобно тому как анодный ток электронной лампы чутко реагирует на изменения напряжения на сетке, так и ток во вторичной обмотке трансформатора чутко реагирует на малейшие изменения постоянного тока в подмагничивающей обмотке. Эта особенность трансформаторов позволяет использовать их для усиления, т. е. осуществить магнитные усилители.

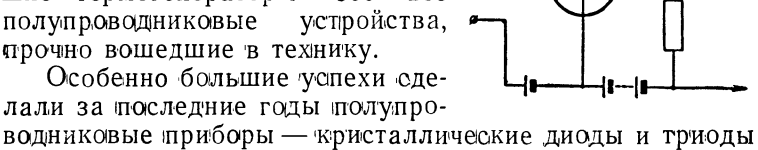
Магнитные усилители дают возможность получать огромные усиления — в десятки и даже сотни тысяч раз; они очень компактны, не боятся толчков и тряски и обладают многими ценными достоинствами. Но у них есть и недостатки. Главнейшим из них является то, что пока они хорошо работают лишь на сравнительно низких звуковых частотах. Однако есть основание полагать, что этот недостаток будет преодолен. Во всяком случае круг тех применений, главным образом в виде очень чувствительных реле, откуда магнитный усилитель вытесняет электронную лампу, все расширяется.

Магнитные усилители потенциально являются опасными соперниками электронных ламп, но, пожалуй, еще бóльшая «опасность» грозит им со стороны полупроводниковых электронных приборов.

Кристадин О. В. Лосева в свое время не выдержал натиска электронной лампы и сдал свои позиции более удачливому сопернику. Но он не был совершенно забыт. Много непонятного было в работе как генерирующих кристаллов Лосева, так и обыкновенных кристал-

лических детекторов. Пытливые исследователи — следопыты науки продолжали изучение их, оказавшееся чрезвычайно плодотворным. Зародилась и развилась новая отрасль науки — наука о полупроводниках.

Полупроводниковые приборы обладают многими ценными свойствами. Виды и области их применения непрерывно множатся. Купроксные и селеновые выпрямители, новейшие термогенераторы — это все полупроводниковые устройства, прочно вошедшие в технику.



Особенно большие успехи сделали за последние годы полупроводниковые приборы — кристаллические диоды и триоды (транзисторы).

Уже само это название говорит об очень многом. Кристаллические диоды и триоды, являющиеся по существу старыми кристаллическими детекторами, названы как лампы — диодами и триодами. Эти названия не шутливые, не такие, которые берутся в кавычки. Они действительно наилучшим образом отражают свойства детекторов новейшего типа. Эти кристаллические детекторы теперь уже не только могут в ряде применений заменить электронную лампу, но часто дают даже лучшие результаты, чем лампа.

У кристаллических диодов все процессы происходят в слое толщиной около одной десятитысячной миллиметра. Входная емкость кристаллического диода около одной десятой пикофарады, а «шумят» кристаллические диоды тем меньше, чем выше частота. Силы вакуумного и кристаллического диодов оказались неравными. Кристалл взял реванш и вытеснил лампу с одной из позиций, прекрасно справившись, в частности, с обязанностями смесителя.

Но эта победа не была, выражаясь языком военных, «локальной», т. е. ограниченной одним местом, в известной степени случайной и маловажной. Было установлено, что кристаллы могут усиливать электрические колебания (см. стр. 219). Электронной лампе приходится потесниться и в ряде применений уступить место полупроводниковым прибором.

Еще один конкурент

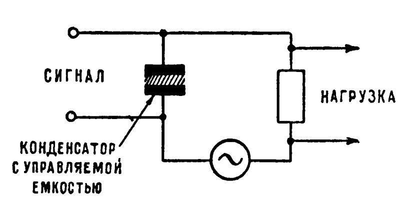
В прошлом удалось выявить еще одного конкурента электронной лампы, причем на первый взгляд трудно даже представить себе, что он способен на это. Таким конкурентом, как ни странно, является конденсатор. Правда, это конденсатор не обычного типа, а с диэлектриком, обладающим особыми свойствами: во-первых, сверхвысокой диэлектрической проницаемостью ε и, во-вторых, способностью изменять величину ε в довольно значительных пределах под действием приложенного к конденсатору напряжения. Подобными свойствами обладают, в частности, такие диэлектрики, как титанаты бария и бариево-стронциевые титанаты.

Небольшое изменение напряжения, приложенного к конденсатору с таким диэлектриком, влечет за собой резкое изменение его емкости. Для материала, используемого в качестве диэлектрика в обычных конденсаторах, такое непостоянство ε является крупным недостатком, так как неустойчивость величины емкости (зависимость ее от напряжения) не позволяет использовать такой конденсатор там, где требуется постоянная емкость. Но это же свойство натолкнуло на мысль о возможности использования конденсаторов с таким диэлектриком для создания усилителей, которые получили название диэлектрических.

Идея, лежащая в основе работы такого усилителя, сходна с принципом работы магнитного усилителя. В магнитном усилителе используется зависимость сопротивления катушки переменному току от величины ее индуктивности, но подобным же свойством обладает и конденсатор: его сопротивление переменному току зависит от величины емкости и будет тем меньше, чем больше емкость. Следовательно, включив конденсатор в цепь с источником переменного тока, можно регулировать величину тока в цепи, изменяя емкость конденсатора. Последовательно с конденсатором можно включить нагрузку, например простое сопротивление. Тогда на на-

грузке будет падать напряжение, пропорциональное току в цепи: если ток в цепи будет меняться, то в точном соответствии с ним будет изменяться и падение напряжения на нагрузке.

Эта зависимость и используется в диэлектрическом усилителе. Действие такого усилителя основано на том, что уже самое небольшое увеличение или уменьшение подводимого напряжения сопровождается значительными изменениями его емкости и приводит к соответственно бо́льшим изменениям величины текущего через конденсатор тока. В результате на нагрузке получается переменное напряжение, величина которого изменяется пропорционально подводимому сигналу, т. е. напряжению, приложенному к конденсатору.



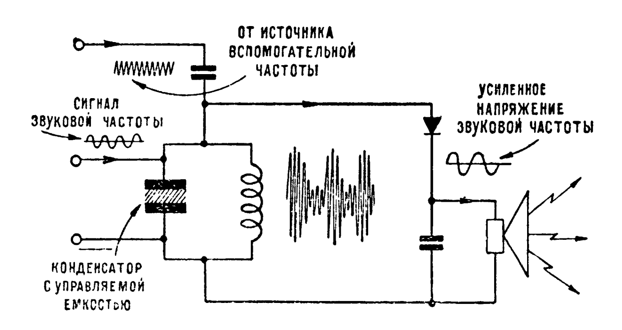
Здесь много общего с магнитным усилителем, в котором используется принцип изменения тока в цепи путем изменения индуктивности под действием приходящего сигнала.

Но у диэлектрического усилителя есть существенные преимущества: область применения магнитных усилителей пока ограничивается токами самых низких частот. Диэлектрический усилитель может работать на очень высоких частотах — до нескольких мегагерц. Работа на таких частотах позволяет использовать еще более эффективный вариант схемы усилителя.

Для этого управляемый конденсатор включается в колебательный контур, который настраивается в резонанс с частотой питающего его вспомогательного источника переменного тока высокой частоты. Как известно, при резонансе сопротивление такого контура очень велико и напряжение на нем достигает максимума. При расстройке напряжение на контуре резко падает. Это свойство можно использовать, например, для получения усиления на звуковых частотах. Для этого усиливаемое напряжение звуковой частоты подается на конденсатор. Вследствие этого емкость конденсатора будет изменяться с такой же частотой, а вместе с тем будет изменяться и высокочастотное напряжение на контуре.

При надлежащем выборе емкости конденсатора и

частоты вспомогательного источника тока можно добиться того, что высокочастотное напряжение на контуре будет изменяться на величину, во много раз превышающую напряжение входного сигнала. Диэлектрический усилитель такого рода выполняет свои функции любопытным образом; он является как бы модулятором-усилителем: высокочастотное напряжение на контуре модулируется приходящим сигналом звуковой частоты.



Продетектировав теперь это модулированное напряжение, мы выделим из него усиленное напряжение звуковой частоты. Имеются данные о том, что один каскад подобного диэлектрического усилителя может дать усиление колебаний звуковой частоты по мощности в несколько сотен и даже тысяч раз.

Описанный вариант схемы диэлектрического усилителя является лишь одним из возможных. Преимущество подобных усилителей заключается в их малых размерах и большой прочности, а также в полном отсутствии затрат энергии на накал катода, которого у диэлектрического усилителя нет вообще. Эти преимущества кажутся довольно заманчивыми, для того чтобы можно было ожидать в ближайшие годы работ по практическому применению диэлектрических усилителей. В последние годы появились усилители еще нескольких типов, о которых рассказывается дальше.

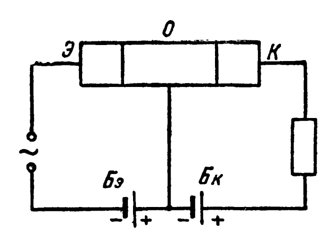


В настоящее время наибольшее распространение получили кристаллические триоды или транзисторы плоскостного типа. Они устроены следующим образом: на противоположных боковых сторонах кристалла — пластинки из полупроводника, которая носит название базы или основания, искусственно создают слои с иным видом проводимости, нежели у самой пластинки. Предположим, что у основной пластинки дырочная проводимость; тогда на ее боковых поверхностях — слева и справа, как показано на рисунке, — будут созданы слои с электронной проводимостью. К основанию и поверхностным слоям приварены проводники, образующие выводы. Между поверхностными слоями, которые обозначены буквами *Э* и *К*, и основанием *О* приложено напряжение от батарей $Б_э$ и $Б_к$ с указанной на рисунке полярностью.

Каждый поверхностный слой образует с основанием как бы диод, а граница между слоем и основанием является внутренним переходом. Таким образом, в транзисторе имеются два внутренних перехода: один — между левым слоем *Э* и основанием *О* и другой — между основанием *О* и слоем *К*. В каждом из этих переходов имеют место процессы, сущность которых описана в очерке на стр. 208. К чему это приводит? К левому слою *Э* приложено отрицательное напряжение относительно основания. Это создает внутри слоя электрическое поле, под действием которого запорный слой на границе между областями *Э* и *О* становится тоньше, и электроны из слоя *Э* будут легко проникать в основание. Образно это можно представить себе так, будто левый слой создает поток электронов, устремляющихся к основанию, как бы «впрыскивает» электроны в кристалл. Поэтому его называют эмиттером — «испускателем», и мы обозначили его на рисунке буквой *Э*.

Переход между эмиттером и основанием имеет малое сопротивление, и это приводит к тому, что небольшие изменения напряжения на эмиттере вызывают значительные изменения тока в его цепи через левый переход.

Теперь посмотрим, что происходит во втором переходе. К правому слою *К*, имеющему электронную проводимость, приложено положительное напряжение относительно основания, и поэтому картина здесь имеет характер, обратный рассмотренному выше: внешнее напряжение создает внутри области *К* электрическое поле, увеличивающее толщину запорного слоя на границе между *О* и *К*. Поскольку своих свободных электронов в основании, имеющем дырочную проводимость, нет, поступления новых электронов из основания в правый слой не будет. Следовательно, и тока во внешней цепи между батареей $Б_к$ и слоем *К* не должно быть. Но зато для продвижения электронов, проникших в основание слева, из эмиттера, создаются очень хорошие условия: они попадают под действие поля, которое способствует их дальнейшему продвижению по направлению к правому поверхностному слою и легкому переходу в этот слой, а затем и далее — во внешнюю цепь, к батарее. Правый слой *К* как бы собирает в себя электроны, «впрыскиваемые» эмиттером. Поэтому ему присвоили название «коллектора» — собирателя.



Ток в цепи коллектора создается, таким образом, за счет электронов, введенных в основание со стороны эмиттера, и будет тем больше, чем больше его эмиссия.

Мы пока говорили только о том, что происходит в транзисторе под действием напряжений, создаваемых батареями питания $Б_э$ и $Б_к$. Если в цепь эмиттера ввести еще и переменное напряжение, то под его воздействием эмиссия будет увеличиваться и уменьшаться с частотой этого напряжения, следовательно, с такой же частотой будут происходить и колебания тока в цепи коллектора.

Нужно оговориться, что приведенное описание процессов, происходящих внутри транзистора, очень упро-

щенно. В действительности эти процессы неизмеримо сложнее.

Теперь перейдем к внешней, выходной цепи — цепи коллектора. В нее включено нагрузочное сопротивление $R_н$, на котором при прохождении коллекторного тока будет создаваться падение напряжения. Чем сильнее ток, тем больше будет падение напряжения на $R_н$. Но так как ток в цепи коллектора зависит от величины эмиссии электронов эмиттером *Э*, можно сказать, что падение напряжения на нагрузочном сопротивлении зависит от величины эмиссии электронов, а последняя в свою очередь определяется введенным в цепь эмиттера переменным напряжением. В такт с этим напряжением будет изменяться и падение напряжения на нагрузке.

Общий «механизм» усиления кристаллического триода можно представить себе таким же, как и у вакуумного триода или вообще у вакуумных электронных ламп (см. стр. 63). При этом, если говорить об аналогии кристаллического триода с электровакуумным, эмиттер можно считать аналогом катода, основание — аналогом сетки, а коллектор — аналогом анода. Триод можно рассматривать для наглядности как переменное сопротивление $R_в$, величина которого зависит от эмиссии эмиттера, в свою очередь зависящей от приложенного к нему напряжения. Это переменное сопротивление соединено последовательно с сопротивлением нагрузки коллектора и источником его питания. В соответствии с изменениями сопротивления триода будет происходить перераспределение напряжений между этим переменным сопротивлением и нагрузочным сопротивлением.

В приведенных схемах включения транзистора на его коллектор подан «плюс». Это необязательно. Широко распространены конструкции, в которых проводимость основания не дырочная, а электронная. Проводимость поверхностных слоев, наоборот, дырочная. Полярность батарей изменяется, на эмиттер подается положительное, а на коллектор — отрицательное напряжение. Эмиттер в этом случае эмитирует уже не электроны, а дырки. Сам же принцип работы транзистора от этого не меняется.



ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ

Может быть, не каждый пытался поразмыслить над тем, что представляет собой усиление.

Мы не можем усилить электрические колебания, не затратив на это известную мощность. Усиленные колебания будут иметь бо́льшую амплитуду, их энергия возрастет. Излишек энергии не может возникнуть из ничего. Он должен быть введен извне.

Так в действительности и происходит. Усилитель не может работать без питания, без ввода в него энергии, причем энергия должна быть введена в систему так, чтобы имеющиеся в ней электрические колебания усилились. Ввод энергии должен происходить в такт с колебаниями, иначе существующие колебания можно не увеличить, а заглушить.

К новым видам усилителей относятся так называемые параметрические усилители. Познакомимся с их работой.

Колебательный контур состоит из катушки индуктивности и конденсатора. Величины индуктивности и емкости являются одними из параметров контура. Вспомним, чему равно напряжение на конденсаторе при подведении к нему какого-нибудь заряда. Оно равно:

$$u=\frac{q}{C},$$

где u — напряжение на конденсаторе; q — его заряд, а C — его емкость.

Напряжение прямо пропорционально величине заряда и обратно пропорционально емкости конденсатора. Из этого выражения вытекает, что для увеличения напряжения на конденсаторе необязательно увеличивать его заряд, т. е. сообщать ему дополнительную порцию

электричества. Этого можно добиться также путем уменьшения емкости конденсатора.

Если в контуре происходят электрические колебания, то заряд и, следовательно, напряжение на конденсаторе изменяются синусоидально. Два раза в течение периода заряд на обкладках конденсатора будет наибольшим.

А что произойдет, если мы как раз в эти моменты уменьшим емкость конденсатора? Заряд конденсатора от этого не изменится, но напряжение на конденсаторе возрастет во столько же раз, во сколько раз уменьшилась емкость конденсатора.

Но увеличение напряжения на конденсаторе означает увеличение амплитуды колебаний, их усиление. Таким образом, для усиления колебаний в контуре можно в моменты наибольшего заряда конденсатора уменьшать его емкость, с тем чтобы в моменты полного разряда конденсатора возвращать емкость конденсатора к его начальной величине. Два раза в течение периода колебаний придется емкость увеличивать и 2 раза возвращать ее к исходному значению. Делать это надо в такт с колебаниями — точно в моменты наибольшего заряда и полного разряда — и в фазе с ними — уменьшать в моменты полного заряда и увеличивать в моменты полного разряда.

Пользуясь таким способом, можно усилить колебания в контуре. Так как усиление осуществляется путем изменения одного из параметров контура, то такой способ получил название параметрического усиления.

Естественно, что усиление и тут не происходит без затраты энергии. В конденсаторе между пластинами существует электрическое поле, и чтобы раздвинуть пластины, надо затратить известную энергию (равную $\frac{\Delta C}{2C^2} q$). Эта энергия увеличивает поле конденсатора, вследствие чего и возрастает напряжение на нем. В моменты полного разряда конденсатора увеличение его емкости до начальной величины не будет сопровождаться сообщением ему какой-либо дополнительной энергии, так как сближение пластин не встречает противодействия поля, которое отсутствует (другого рода потери энергии на восстановление начальной емкости конденсатора мы для простоты не учитываем).

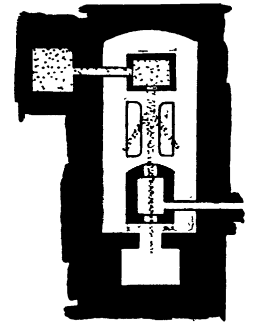
Практическое осуществление параметрического уси-

лителя не представляет особой сложности. Для этой цели можно воспользоваться, например, полупроводниковым диодом. У диода имеется запорный слой, в котором отсутствуют свободные носители зарядов. Этот слой находится между слоями различной проводимости. Таким образом, диод по существу представляет собой конденсатор. Расстояние между «пластинами» этого конденсатора, т. е. толщина запорного слоя, зависит от знака и величины напряжения в обоих слоях. При подведении напряжения в «прямом» направлении толщина слоя уменьшается, при подведении напряжения обратного значения она увеличивается. Изменяя напряжение на слоях диода, можно изменять нужным образом емкость «конденсатора», которым является диод. Диод представляет собой «конденсатор переменной емкости» у которого изменение емкости может управляться теми же колебаниями, которые надо усилить, а электропитание он получает от генератора, который часто называют генератором накачки.

Увеличение амплитуды колебаний, их усиление не могут быть бесконечны. По достижении некоторого предела устройство начнет генерировать колебания — превратится в параметрический генератор.

Современные диоды позволяют параметрическим усилителям работать на очень высоких частотах — до нескольких десятков тысяч мегагерц. Параметрические усилители характерны очень малыми собственными шумами. Если на запорный слой подать некоторое отрицательное смещение, то свободные носители зарядов будут в этом слое практически отсутствовать и шумы окажутся сведенными к незначительной величине.

Как заметил, наверное, читатель, у параметрических усилителей очень много общего с регенеративными усилителями. Это сходство простирается еще дальше. Возможно устройство своего рода «сверхрегенеративных» параметрических усилителей. Принципы действия сверхпараметрического и сверхрегенеративного усилителей по существу аналогичны. Параметрический усилитель определенное количество раз в секунду доводится до генерации, которая тут же гасится (так же работает и сверхрегенератор). Параметрический сверхрегенератор позволяет усиливать мощность сигнала в некоторых случаях в десятки миллионов раз.



МОЛЕКУЛА КОНКУРИРУЕТ С РАДИОЛАМПОЙ

Принцип действия усилителей с лампой бегущей волны известен довольно широко. В этой лампе излучаемый катодом пучок электронов окружен спиралью, по которой движется электромагнитная волна. Диаметр витков и шаг спирали подбираются так, чтобы продвижение волны вдоль оси спирали происходило с такой же скоростью, с какой движутся электроны в пучке. Движущаяся волна взаимодействует с пучком электронов; она образует в нем сгущения и разрежения в соответствии с ее полем. Эти сгущения и разрежения, продвигаясь по пучку, в свою очередь взаимодействуют с волной и, находясь в такте и фазе с нею, усиливают ее. Происходит обмен энергией между пучком электронов и электромагнитным полем. Усиление происходит в конце концов за счет энергии источников питания лампы. Для нас в данном случае представляет интерес то, что электромагнитные колебания усиливаются здесь не в контуре, а непосредственно в пространстве внутри лампы. Лампа черпает энергию для своего усиления из поля электронного пучка.

Нечто похожее происходит и в одном из новейших видов усилителей — в молекулярных усилителях. Здесь волна движется в атмосфере какого-нибудь газа, «по пути» отнимает у него энергию и вследствие этого усиливается. Энергия газовых молекул при этом уменьшается. Так как непосредственное участие в этом виде усиления принимают молекулы, то такие усилители и были названы молекулярными.

После прочтения предыдущего абзаца у читателя возникнут два вопроса. Первый — почему же электромагнитные волны, распространяясь в воздухе, т. е. тоже в газе, не усиливаются? Второй — в этом случае как будто нарушается «закон» о необходимости расходова-

ния энергии на усиление? Ведь для газа не нужны батареи накала или анодные, а если на усиление и расходуется энергия газа, то это энергия «бесплатная» — пусть себе после усиления энергия газа станет меньше, пусть он, например, охладится.

Ответ на эти вопросы очень прост: не каждый газ способен усиливать электромагнитные колебания. Это может проделать только особым образом подготовленный газ, и на эту его подготовку приходится затрачивать энергию.

Обычно мы имеем дело с большими массами вещества, которые подчиняются законам старой классической физики. Масса тела, его скорость, его энергия могут быть любыми. Скажем, скорость тела может изменяться плавно. Даже отдельные элементарные частицы могут обладать произвольными скоростями и, следовательно, любым количеством кинетической энергии. Но если элементарные частицы образуют наиболее примитивные связанные системы, например атомы или молекулы, то внутренняя энергия такой системы, обусловленная взаимным расположением составляющих ее частиц, не может принимать любые произвольные значения. Эти значения могут быть только вполне определенными. Их может быть несколько, система может иметь определенный набор допустимых, «разрешенных» для нее так называемых энергетических уровней. Ее энергия не может получить значение, по величине промежуточное между двумя «разрешенными» уровнями. В таких случаях говорят, что энергия системы квантована. Изменение энергии системы может происходить только скачками — с одного «разрешенного» уровня на другой.

Изменение энергетического уровня сопровождается определенными физическими изменениями. Они могут состоять, например, в переходе электрона с одной оболочки на другую или в изменении вращательной энергии молекул.

Для того чтобы элементарная система перешла на высший энергетический уровень, ей должно быть сообщено определенное количество энергии. Это может быть энергия электромагнитной волны. Такой газ будет поглощать электромагнитные волны соответствующей частоты. Если элементарная частица возвратится в свое первоначальное энергетическое состояние, то она излу-

чит электромагнитную волну такой же частоты. Следует учесть два обстоятельства. Первое: энергии, нужной для перехода элементарной системы на более высокий энергетический уровень, соответствует совершенно определенная частота электромагнитных колебаний. Объясняется это тем, что энергия электромагнитной волны зависит от ее частоты. Данные элементарные системы будут поглощать и излучать электромагнитные волны только совершенно определенной частоты. Второе: наиболее устойчивым состоянием системы является состояние, соответствующее наименьшему энергетическому уровню. Каждая система, находящаяся на более высоком энергетическом уровне, стремится перейти в такое устойчивое состояние. Достаточно малейшего импульса извне, чтобы такой переход состоялся и система перешла в устойчивое состояние, излучив порцию электромагнитных колебаний.

Представим себе теперь, что у нас имеется газ, все молекулы которого искусственно переведены на некоторый энергетический уровень, превышающий наименьший. Можно сказать, что они находятся в «возбужденном» состоянии. Если через этот газ пропустить электромагнитные колебания соответственной частоты, то под их воздействием элементарные системы будут совершать переход на наиболее устойчивый низший энергетический уровень, а освобождающаяся при этом энергия будет излучаться ими в виде электромагнитных колебаний той же частоты, какая вызвала этот переход. Таким образом, электромагнитные волны, попавшие в атмосферу такого «возбужденного» газа, усиливаются, их энергия увеличивается за счет той, которая излучается элементарными системами, образующими газ.

Конечно, такое увеличение энергии не будет длительным. Через какой-то промежуток времени, практически очень короткий, все частицы газа перейдут на низший уровень и усиление электромагнитных волн прекратится. Вернее, начнется обратный процесс — частицы газа начнут поглощать кванты энергии электромагнитной волны (ведь она именно такой частоты, какая нужна для этого) и вновь переходить в «возбужденное» состояние. На это будет затрачиваться энергия электромагнитной волны, введенной в газ, и она начнет не усиливаться, а ослабляться.

Чтобы этого не произошло, надо непрерывно поддерживать частицы газа в возбужденном состоянии. Это и делается в молекулярных усилителях. Такие усилители представляют собой герметизированный и предварительно откачанный стеклянный сосуд, через который пропускается пучок молекул газа, обычно аммиака, соответствующим образом обработанных и отсеянных, т. е. находящихся в «возбужденном», активном состоянии. В сосуде они проходят через объемный резонатор, взаимодействуют с электромагнитной волной и отдают ей свою энергию. Потерявшие активность молекулы газа откачиваются, а на их место в сосуд поступают все новые массы активных молекул. Усиленные электро магнитные колебания отводятся из объемного резонато ра обычными способами.

Здесь рассказано о молекулярном усилителе лишь в самых общих чертах и в упрощенном виде, чтобы дать представление об основном принципе его работы. Молекулярные усилители сложны, но они обладают одним важным преимуществом — они не «шумят», они почти свободны от «внутренних» шумов. Их известным неудобством является возможность усиления колебаний лишь одной частоты, свойственной используемому газу. У аммиака эта частота соответствует длине волны 1,27 *см*. Зато такое постоянство частоты является исключительным преимуществом молекулярных генераторов, так как, используя разобранный принцип, можно делать не только усилители, но и генераторы. Молекулярные генераторы возбуждают строго постоянную частоту. Два экземпляра молекулярного генератора имеют частоту, отличающуюся друг от друга не больше, чем на одну миллиардную долю. Молекулярный генератор — самый стабильный по частоте генератор из всех известных.

Для работы молекулярного генератора нужен пучок из миллиарда миллиардов молекул в секунду. Откачка такого количества молекул трудна. Поэтому отработанные молекулы аммиака (как было сказано, практически в настоящее время используется аммиак) просто вымораживаются.

Внутри сосуда помещают поверхности, охлаждаемые жидким азотом до температуры минус 196° С. Молекулы «отработанного» аммиака примерзают к этим поверхностям.

С помощью аппаратуры такой «квантовой радиоэлектроники» нашими учеными Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым достигнуты были замечательные результаты. Например, оказалось возможным создать «радиоэлек тронные сверхточные часы», дающие ошибку за 3 000 ле на 1 *сек.*



Отсутствие шумов, свойственное молекулярным усилителям и генераторам, является их огромным положительным качеством. Они способны усиливать или генерировать электромагнитные колебания только одной частоты. Ни перестраивать такие усилители и генераторы на другую частоту, ни усиливать или генерировать при их помощи широкую полосу частот не представляется возможным. Поэтому их «моночастотность» можно считать одновременно и большим достоинством и не менее значительным недостатком.

Нельзя ли как-нибудь обойти этот недостаток?

Попробуем разобраться в том, почему молекулярный усилитель моночастотен. Действующий в усилителе (генераторе) пучок молекул состоит из отдельных самостоятельных молекул, не находящися во взаимосвязи. Такие молекулы совершенно однородны, имеют одинаковые «разрешенные» энергетические уровни, и переход молекул с одного уровня на другой сопровождается поглощением или излучением электромагнитных колебаний точно одинаковой частоты.

Из молекулярной физики известно, что если молекулы находятся во взаимосвязи с другими молекулами, то образованные связанными молекулами системы имеют другие энергетические уровни, нежели отдельные молекулы, а само число «разрешенных» уровней будет больше. Поэтому многочастотный усилитель должен иметь в качестве «рабочего тела» связанные молекулы. Та-

кие молекулы могут возникнуть в газах, если частицы его испытывают столкновения, т. е. могут комбинироваться. Еще чаще такие молекулы могут возникнуть в жидкостях и твердых телах.

Однако в этих случаях весьма трудно переводить молекулы или их системы в активное «возбужденное» состояние, в котором они обладают избыточной энергией. Но нашим ученым удалось преодолеть это затруднение и разработать способ усиления (генерирования), получивший название парамагнитного.

Суть его заключается в следующем. Был взят парамагнитный кристалл, имеющий три энергетических уровня: энергия третьего уровня больше энергии второго, энергия которого в свою очередь больше энергии первого, являющегося самым низким. Если такой кристалл охладить, то число частиц, находящихся на разных уровнях, будет неодинаковым. Например, при некоторых условиях больше всего частиц будет на низшем уровне. На среднем уровне их будет на 5% меньше, а на высшем — на 20% меньше.

При пропускании через кристалл электромагнитных волн такой частоты, которая соответствует разности энергий между любыми из трех уровней, будет происходить поглощение энергии. При подборе волн нужной частоты будет, например, происходить переход частиц с первого (низшего) уровня на третий. В результате число частиц на первом и третьем уровнях может стать одинаковым. При этом на среднем уровне окажется больше частиц, чем на низшем; следовательно, в кристалле будет иметься избыток энергии, он будет «возбужден». Если в него направить электромагнитную волну, способствующую переходу частиц со второго уровня на низший, то будет освобождаться энергия; в результате эта электромагнитная волна окажется усиленной.

Парамагнитный кристалл приходится сильно охлаждать — почти до температуры абсолютного нуля. Охлаждение производится жидким гелием. Кристалл помещается между полюсами сильного магнита. Изменяя величину магнитного поля, можно в широких пределах перестраивать усилитель на разные частоты.

Внутренние шумы парамагнитных усилителей крайне малы, чему способствует сверхнизкая температура.

Парамагнитные усилители и генераторы пока сложны и неудобны, но они имеют много важных достоинств. Если удастся обойтись без охлаждения и других усложнений, то усилительным элементом будет являться один кристалл — не портящийся, не изнашивающийся, не боящийся тряски и пр. Электромагнитные колебания пропускаются через кристалл и выходят из него усиленными.

Перспектива очень заманчивая и отнюдь не фантастическая.



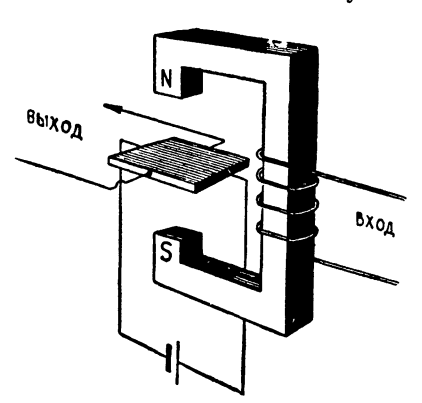
На горловину электронно-лучевой трубки надет магнит ионной ловушки. Назначение его известно — он отклоняет пучок электронов, летящих от катода к аноду трубки. Отклонение происходит из-за взаимодействия движущихся зарядов с магнитным полем. В результате электронный пучок попадает в отверстие диафрагмы и получает возможность двигаться дальше, а более тяжелые ионы отклоняются меньше, в отверстие не попадают и задерживаются диафрагмой.

Представим себе теперь, что мы подвели электрическое напряжение к кубику из токопроводящего материала, например к его верхней и нижней граням. Под воздействием электрического поля свободные заряды в этом материале начнут двигаться внутри кубика от его верхней грани к нижней или наоборот, что зависит от направления поля и знака зарядов. Движение зарядов будет равномерным по всей толще материала, поэтому ни на одной из его остальных (боковых) граней не возникнет напряжения относительно другой грани.

Но мы знаем, что если заряды движутся в магнитном поле, то они смещаются в одну сторону. Поэтому, поместив наш кубик в магнитное поле, мы вправе ожидать, что заряды, образующие ток, будут смещаться в одну сторону. У одной грани, куда заряды будут «сдуваться», их окажется больше, чем у противоположной. А если количество зарядов у граней неодинаково, то между ними должно возникнуть электрическое напряжение.

Американский ученый Э. Холл установил в 1881 г., что такое напряжение действительно возникает. Он помещал проводящий материал в магнитное поле и подводил к нему напряжение. На боковых поверхностях материала в соответствии со сказанным выше возникало напряжение. Это явление было названо эффектом Холла.

Исследование эффекта Холла выявило возможность использования его для усиления. Оказалось, что величина напряжения, возникающего на боковых гранях проводящего тела, которое можно для краткости назвать «напряжением Холла», находится в чрезвычайно большой зависимости от величины магнитного поля. Малейшие изменения магнитного поля вызывают большие изменения напряжения Холла и тока в цепи, замкнутой на это напряжение.



На рисунке изображено усилительное устройство, действие которого основано на использовании эффекта Холла. Кубик или прямоугольная пластинка проводящего материала помещается в поле магнита с обмоткой. К этой обмотке подводятся электрические колебания, которые надо усилить. К двум граням в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля, подводится вспомогательное напряжение, создающее ток внутри материала. С двух противоположных граней снимается напряжение Холла, являющееся выходным.

Очень малые изменения тока во входной обмотке вызовут гораздо бо́льшие изменения напряжения Холла. В результате электрические колебания будут усилены.

В качестве «рабочего тела», т. е. токопроводящего материала, в усилителях этого рода применяют полупроводники с высокой подвижностью зарядов, например индий — сурьма или индий — мышьяк.

Усилители, построенные на этом принципе, чрезвычайно чувствительны к изменению магнитного поля и, в частности, к перемещению магнитных масс. При их помощи можно обнаружить перемещение магнитных масс на величину порядка 10^{-8} *см*.

Энергия, за счет которой происходит усиление, черпается в таких усилителях из батареи, поддерживающей ток в проводнике. Принципиально подобные усилители весьма просты, не содержат изнашивающихся частей, начинают работать сразу после включения.

Эти качества делают их применение и совершенствование весьма перспективными.

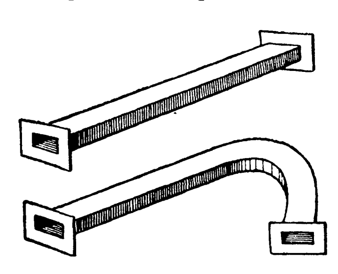


Современная радиотехника использует колебания очень высоких частот.

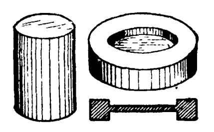
Сверхвысокие частоты обладают рядом особенностей. Так, например, для передачи энергии сверхвысокой частоты при длине волны всего несколько сантиметров обычные провода совершенно непригодны и даже высокочастотные кабели вносят большие потери. Энергию такой частоты передают по специальным устройствам — волноводам, которые представляют собой полые металлические (чаще всего медные) трубы круглого или прямоугольного сечения, поперечные размеры которых близки к длине волны (но не меньше половины ее). Электромагнитные волны распространяются внутри такой трубы и таким образом передаются, например, от передатчика к антенне или от антенны

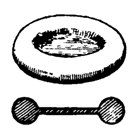
к приемнику. При этом потери энергии в самом волноводе очень невелики.

Резонансные контуры для таких частот также имеют совершенно непривычную конструкцию. У них отсутствуют отдельные катушки и конденсаторы, так как индуктивность даже одного витка оказывается чрезмерно большой. Контур для сантиметровых волн представляет собой как бы металлическую банку цилиндрической, прямоугольной или более сложной формы, внутри которой и происходят электромагнитные колебания.



Размеры контура зависят от длины волны. Для цилиндра, например, диаметр должен быть равен примерно





половине длины волны. Контуры такого рода отличаются чрезвычайно высокой добротностью. Они обладают всеми характерными свойствами резонансных контуров и названы объемными резонаторами, так как колебания происходят внутри их объема.

Но этим не исчерпываются особенности аппаратуры для сверхвысоких частот. Одно из их многих поразительных свойств заключается, например, в том, что энергию волн длиной в несколько сантиметров можно, оказывается, передавать по линии из изоляционного материала — диэлектрика.

Это не опечатка: именно по «проводнику» из непроводника. Оказывается, если изготовить волновод в виде стержня соответствующих размеров из диэлектрика, обладающего малыми потерями и высокой диэлектрической проницаемостью, то электромагнитная энергия вдоль такого волновода будет распространяться так же, как если бы он был сделан из металлической трубы. На волнах длиной 1—3 *см* такие диэлектрические волноводы оказываются иногда даже более выгодными и удобными, чем металлические.

Теперь нас, пожалуй, уже не удивит и то, что для сантиметровых волн можно применить антенну не метал-

лическую, а также из изоляционного материала. Такая антенна представляет собой небольшой стержень из диэлектрика, утолщенный с одного конца и постепенно сужающийся к другому. Электрическая мощность подводится к антенне со стороны ее толстого конца. Для излучения волн длиной, например, 10 *см* потребовался бы стержень из полистирола длиной 30—40 *см*, имеющий диаметр порядка 4,5—5 *см* в своей утолщенной части и порядка 3 *см* на тонком конце. Можно применить и другой диэлектрик с малыми потерями.

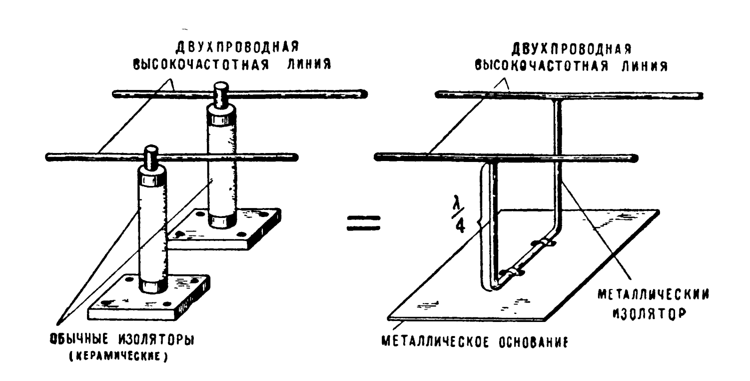
Металлический ИЗОЛЯТОР

Что произойдет, если два токонесущих провода замкнуть металлической перемычкой? Очевидно, между этими проводами получится короткое замыкание.

Это, конечно, верно, но не всегда. На постоянном токе металлическая перемычка будет замыкателем. Но и при переменном токе металлической перемычке можно придать такую длину, что поведение проводника резко изменится: он как бы потеряет свою проводящую способность и превратится в изолятор. Это особенно легко осуществить на сверхвысоких частотах, где перемычки имеют небольшие размеры.

Если, например, двухпроводную линию, по которой передается энергия колебаний с частотой 100 *Мгц* (волна 3 *м*), замкнуть П-образным проводом, боковые стороны которого имеют в длину по 75 *см*, то такая перемычка не явится коротким замыканием: процессы в линии будут происходить так, как будто никакой перемычки нет, как будто перемычка сделана из изоляционного материала. Можно длинную двухпроводную линию укрепить на таких металлических «изоляторах», и никакой утечки энергии не произойдет.

Такое необычайное и противоречащее на первый взгляд здравому смыслу явление объясняется тем, что процессы в проводниках имеют особый характер, когда



длина провода оказывается соизмеримой с длиной волны. В нашем случае длина стороны металлической стойки (75 *см*) равняется четверти длины волны (3:4= =0,75). Мы получаем отрезок двухпроводной линии длиной в четверть длины волны, замкнутой накоротко с одной стороны. При присоединении такого отрезка к линии, по которой передается энергия колебаний, имеющих ту же длину волны, в нем возбуждаются так называемые стоячие волны, особенностью которых оказывается то, что на открытом конце, т. е. в том месте, где стойка соединяется с линией, ток равен нулю.

А если ток равен нулю, то это эквивалентно случаю, когда сопротивление равно бесконечности. Металлическая четвертьволновая стойка обладает для резонансной частоты бесконечно большим сопротивлением, т. е. является как бы изолятором.

Конечно, как только нужное соотношение нарушится и волна станет длиннее или короче резонансного значения, т. е. высота стойки не будет равна четверти длины волны, металлическая стойка потеряет свои «изоляционные» свойства и станет потреблять энергию.

Другой, замкнутый накоротко конец стойки тоже обладает интересным свойством: стоячая волна располагается так, что на этом конце напряжение высокой частоты равно нулю. А это значит, что его можно укрепить на заземленной металлической поверхности и никакой утечки тока это не вызовет.

Это замечательное свойство четвертьволновой замкнутой накоротко на одном конце линии находит широкое применение в технике метровых и сантиметровых

волн. На более длинных волнах характер этого явления сохраняется, но «металлический изолятор» оказывается слишком длинным и практически неприменим. Например, на самой короткой волне средневолнового диапазона четвертьволновая линия имела бы длину 50 *м*. Даже на коротких волнах четверть волны составляет несколько метров.



Телефон без проводов и без радио

Радиовещание стали возможным потому, что радиоволны распространяются вокруг антенны передатчика во все стороны и передачу может принять любой обладатель радиоприемника.

Но иногда эта особенность радио превращается из достоинства в недостаток. Это происходит в том случае, если радиопередачу не должен принимать тот, кому она не адресована, т. е. если нужно, чтобы передачу нельзя было подслушать. Так бывает, например, в военных условиях, когда нужна уверенность, что разговор не может быть уловлен противником. А радиопередачу как раз и легко перехватить и вдобавок обнаружить место расположения передатчика.

Большим недостатком является и то, что противник может сравнительно простыми средствами создать такие помехи, при которых радиоприем оказывается невозможным.

Все это, вместе взятое, привело к поискам такого способа связи на расстоянии без проводов, при котором эти недостатки отсутствовали бы.

Во время второй мировой войны для связи на небольших расстояниях применялся световой (оптический) телефон, сущность которого сводилась к следующему: передатчиком служил мощный источник света, который излучал тонкий световой луч в направлении

приемника. Свет передатчика модулировался со звуковой частотой, т. е. яркость источника управлялась колебаниями звуковой частоты. В приемнике такой модулированный световой луч воздействовал на фотоэлемент и колебания света преобразовывались снова в электрические колебания звуковой частоты, которые приводили в действие телефон или громкоговоритель.

Подслушивать такой «световой» разговор трудно, и создать для него помехи не так-то просто. А вот увидеть источник света и таким образом обнаружить линию связи все же возможно.

Инфракрасные лучи позволяют избавиться и от этого недостатка. Принцип связи остается таким же, как описанный выше, но в передатчике используются специальные источники излучения, например цезиевые или циркониевые лампы. Невидимый луч такой лампы модулируется звуковой частотой и в месте приема попадает на фотоэлемент, чувствительный к инфракрасным лучам, а затем усиливается, как обычно, усилителем низкой частоты и заставляет работать акустический аппарат.

Применяются телефонные линии такого типа для связи на небольшие расстояния.



Последние строки очерка «Два окна прозрачности» (стр. 143), вероятно, несколько удивили многих читателей. Из этих строк следует, что для связи с космическими кораблями и другими планетами будут «в частности пользоваться» и радио.

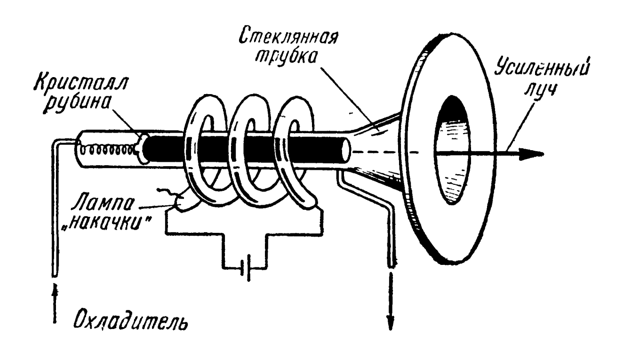
— А чем же еще можно пользоваться для этой цели? — спросит читатель. — Ведь радио как будто является единственным способом связи на расстоянии без проводов.

Однако быстрое развитие науки показало, что радио нельзя считать монополистом в области космической

связи. В очерке о парамагнитных усилителях и генераторах (см. стр. 229) рассказывалось о том, что атомы кристалла могут переходить в возбужденное состояние и иметь излишек энергии, который при известных обстоятельствах может быть ими отдан. На использовании этого явления основано действие парамагнитных усилителей и генераторов.

Некоторые кристаллы обладают способностью на сравнительно долгое время запасать сообщенную им энергию и при определенном на них воздействии сразу отдавать ее. Накопленная в течение какого-то промежутка времени энергия отдается мгновенно, поэтому мощность излучения может быть весьма велика.

В числе кристаллов этого типа есть такие, которые накапливают свет, т. е. приводятся в возбужденное состояние путем облучения светом, и световые же лучи отдают, когда для этого складываются нужные условия.



Одним из кристаллов, обладающих подобными свойствами, является рубин — общеизвестный драгоценный камень. Кристалл рубина облучается специальной ртутной лампой и поглощает из этого облучения красный свет, накапливая его. В опытном устройстве этого рода был применен кристалл рубина длиной около 7 *см* и диаметром около 3 *см*. Торцы кристалла посеребрены. На одном из торцов крошечная точка оставлена непосеребренной.

Когда больше половины ионов хрома, входящего в состав рубина, переходит в возбужденное состояние, они мгновенно «разряжаются», излучая через оставлен-

ное в слое серебра окошко пучок красного света огромной интенсивности. О направленности этого пучка света можно судить хотя бы по тому, что на Луне он осветил бы площадь диаметром 16 *км*, причем сила света была бы достаточной для того, чтобы читать мелкий газетный шрифт. Никакими антеннами нельзя так сконцентрировать радиоизлучение. Луч света, создаваемый кристаллом рубина, по существу не похож на привычный нам свет. Этот луч создает давление, равное 300 атмосферам.

Излучатели с кристаллами такого типа получили название «лазер». Высказываются предположения, что подобные «лазеры» будут очень удобны для космической радиосвязи.



Сочетание слов, стоящих в заголовке, ново и несколько странно. Что это еще за новый вид связи?

Но тем не менее такое сочетание слов уже встречается в литературе. Оно охватывает ряд явлений, известных и ранее, но настоящее изучение которых начато или, вернее, начинается в самое последнее время. То, что происходит теперь, можно с наибольшим правом назвать лишь предварительным накапливанием фактов и первыми прикидками их объяснения. Будущее покажет, к какому классу относятся наблюденные явления и какова их физическая основа. Во всяком случае нельзя исключить возможность того, что эти основы окажутся так или иначе близкими к радиотехнике, поэтому упоминание о том, что условно названо биологической радиосвязью, в книге этого жанра оправдано.

Начать хочется с бабочек.

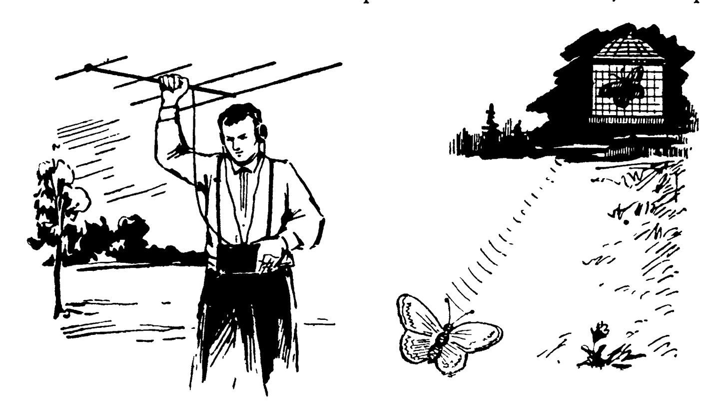
Наш советский энтомолог И. А. Фабри в течение нескольких лет изучал особенности жизни ночной бабочки одного из видов, встречающегося у нас довольно редко. Его заинтересовал способ, при помощи которого самцы бабочек этого вида находят самок. Малочисленность этих бабочек облегчала опыты, так как давала возможность следить за определенными парами.

И. А. Фабри помещал самку в клетку, а самцов, меченных краской, относил на большое расстояние. Несмотря на это, они быстро прилетали обратно к самке. В опытах Фабри расстояние доходило до 8 *км*, причем учитывалось направление ветра. Самцы бабочек относились в ту сторону, откуда дул ветер, поэтому возможность использования органов обоняния исключалось, а об использовании органов слуха не могло быть и речи, так как в условиях опыта на таком расстоянии не была слышна даже ружейная стрельба.

Но при всем том бабочки моментально находили нужное направление и летали по пути, близкому к прямому. Это было легко установить, зная расстояние и скорость полета бабочек данного вида (расстояние 8 *км* они преодолевали примерно за 45 *мин*).

Самым интересным в опытах И. А. Фабри было то, что он установил решающее значение усиков бабочки. Если у самца бабочки отрезать усики-антенны, то он оказывается лишенным способности находить дорогу к самке.

Отсюда с неоспоримостью вытекало, что самка бабочки посылает какие-то призывные сигналы, которые



самцы воспринимают своими усиками-антеннами. Физическую природу этих сигналов пока установить не удалось, но весьма вероятно, что это электромагнитные колебания, во всяком случае никакие другие способы передачи сигналов в подобных условиях нам неизвестны.

Опыты с бабочками не единичны. Известны и другие примеры передачи сигналов насекомыми при обстоятельствах, при которых наиболее вероятным физическим агентом — переносчиком сигналов — являются электромагнитные колебания. На этом основании связь подобного рода пока условно и называют биологической радиосвязью. Поскольку возбудителями предполагаемых электромагнитных волн служат биологические объекты, то естественно назвать подобную радиосвязь биологической.

Исследования в области биологической радиосвязи не ограничиваются низшими формами животного мира. Предметом широких исследований в этом отношении стал и сам человек.

Очень многим приходилось сталкиваться с удивительными случаями «передачи мыслей». Чаще всего это проявляется в том, что людям, состоящим в близком родстве или хорошо знающим друг друга, одновременно вспоминаются одни и те же лица или факты, «приходят в голову» одни и те же мотивы и пр. Сюда относятся и «встречные письма»: два человека долгое время собираются написать один другому, но никак не могут собраться осуществить свое намерение. Когда же они, наконец, сделают это, то оказывается, что написали они одновременно и письма их «разошлись».

Возможность какого-то подобия передачи мыслей на расстояние, возможность того, что условно называют биологической радиосвязью, подтверждается и специально поставленными опытами.

25 июля 1959 г. подводная лодка «Наутилус», входящая в состав флота США, приняла на борт пассажира и вышла в океан. Она крейсировала в океанских глубинах 15 суток, и все это время пассажир оставался в своей каюте, не покидая ее ни на минуту. Дважды в день он молча передавал приходившему к нему капитану листок бумаги, который тут же вкладывался в конверт и опечатывался. На конверте проставлялись дата и гриф «Сверхсекретно».

10 августа подводная лодка ошвартовалась у берега. Пассажир «Наутилуса» и конверты были на самолете доставлены в город. В кабинете директора Отдела биологических наук при управлении исследований воздушных сил конверты были вскрыты и заключенные в них листки сличены с листками, хранившимися в сейфе. На всех листках были изображены простые рисунки. Сопоставление листков с одинаковыми датами показало совпадение рисунков более чем в 70% всех случаев.

Это было трудно объяснить чем-нибудь другим, кроме передачи мыслей. Опыт был поставлен так. На берегу один человек под строгим контролем и в обстановке, исключающей возможность обмана, в определенное время суток фиксировал свои мысли на данном ему рисунке. Рисунок этот предлагался ему комиссией ученых. Выбор рисунка осуществлялся машиной, гарантировавшей полную случайность выбора.

Следует добавить, что расстояние, на которое уходила подводная лодка, достигало 2 000 *км* и опыты проводились и тогда, когда она была на значительной глубине.

С тех пор в различных странах, в том числе и у нас, было проделано много подобных испытаний в самой различной обстановке. Опыты, поставленные со всей тщательностью и изобретательностью, на какую способны современные ученые, давали постоянно в среднем одно и то же количество совпадений — около 70%.

Многие процессы, происходящие в нашем организме, в частности в мозгу и нервной системе, в какой-то степени являются электрическими. Это уже доказано. Поэтому не будет особенно удивительным, если какая-то сторона жизнедеятельности окажется связанной и с электромагнитными процессами. Исследования в этой области очень трудны, необходимо накопление возможно большего количества наблюдений, как можно больше исходного материала.

СВЯЗЬ на волнах тяготения

Наше время характерно не только стремительным развитием науки и техники, но и смелыми поисками, дерзновенными попытками подчинить человеку все новые силы природы. В последнее время ученые всего мира под этим углом зрения изучают силы тяготения.

Мы встречаемся с силами тяготения буквально на каждом шагу. Ведь ходьба с точки зрения механики есть ряд последовательных падений тела, вызываемых силой тяготения и вовремя предупреждаемых выставлением вперед ноги. Всякое наше движение делается с учетом этих сил, но сущности их мы не знаем. Природа тяготения нам неизвестна. Ни разу не удалось обнаружить, что гравитационные силы распространяются с какой-нибудь скоростью, и лишь по аналогии предполагают, что эта скорость не может быть больше скорости света. Ни одно из проделанных до сего времени наблюдений не показало, что от сил тяготения можно загородиться. Они свободно проходят через любые экраны, не испытывают отражения и отклонения.

Весьма заманчиво использовать их для связи.

Проводная связь была огромным шагом вперед по сравнению с кострами, семафорами и гонцами, но у нее есть и масса недостатков. Радиосвязь была следующим шагом, она обладает огромными возможностями, но и она не идеальна. Радиоволны испытывают поглощение, отражение, они, к сожалению, совсем не свободны от помех. Это особенно чувствуется при связи на космических расстояниях, а надобность в такой связи уже стала реальностью сегодняшнего дня.

На сцену выходят световые волны. Кристаллы, стреляющие светом (стр. 238), рассматриваются именно как будущее средство для космической связи. Но недостатки световых волн нам известны. Любое пылевое облако прервет их путь. Поэтому внимание привлекли силы

тяготения, не знающие преград. Если бы удалось использовать их для связи, то лучшего, кажется, нельзя было бы желать.

В литературе можно найти много статей о волнах тяготения. Столь же условными являются и «кванты тяготения» — гравитоны, о которых тоже идет разговор при попытках представить себе физическую сущность тяготения. Такая двойственность нас теперь уже не удивляет — если электромагнитные волны могут быть одновременно и потоком частиц-фотонов и представлять собой колебательный процесс, то такой же двойственной природой могут обладать и силы тяготения. Интересными являются осторожно высказываемые предположения о возможности использовать эти условные «волны тяготения» для целей связи.

Можно думать, что в данном случае общий ход освоения нового физического фактора обратен обычному. Не выявленные возможности тяготения позволили делать прогнозы об их использовании для связи, а, наоборот, особые свойства тяготения, его всепроникающая способность пробудили желание применить их для сверхдальней связи без помех. Но так или иначе работа идет. Могущественный арсенал средств современной науки обращен на исследование и изучение гравитационных сил, причем одной из целей этого изучения является организация сверхдальней связи на «волнах тяготения».

Такое стремление характерно для развития науки в наши дни. Не только использовать определившиеся возможности, но организовывать их там, где к этому есть хотя бы какие-нибудь данные. Например, тысячи лет существовала оптическая астрономия. Она пользовалась тем, что мы теперь называем «окном прозрачности». Развитие радиоэлектроники открыло существование второго «окна прозрачности». Немедленно зародилась и быстро повзрослела новая отрасль науки — радиоастрономия, намного расширяющая наши возможности познания вселенной. Одновременно начались изыскания новых «окон». И теперь уже начинают поговаривать о «нейтринной астрономии». Здесь тоже желание предваряет реальные результаты исследований. Мельчайшие незаряженные частицы — нейтрино обладают баснословными проникающими способностями — длина

свободного пробега нейтрино в сплошном металле равна десяткам световых лет. Поэтому вполне понятен соблазн использовать нейтрино для исследовательских целей.

Будущее покажет — прибавятся ли к радиопередатчикам и лазерам еще и «гравитационные передатчики».



Радиоастрономия зародилась лишь в послевоенные годы, но развивается она очень быстро. Новое средство познания мира — радиотелескопы — множатся небывалыми темпами, и их огромные устремленные в небо параболоиды не представляются уже редкостью.

Среди многих радиоизлучений, воспринимаемых этими телескопами, характерно одно, имеющее длину волны 21 *см*. Его можно уловить отовсюду, весь космос звучит на этой волне.

Что же является источником космических радиопередач с такой длиной волны?

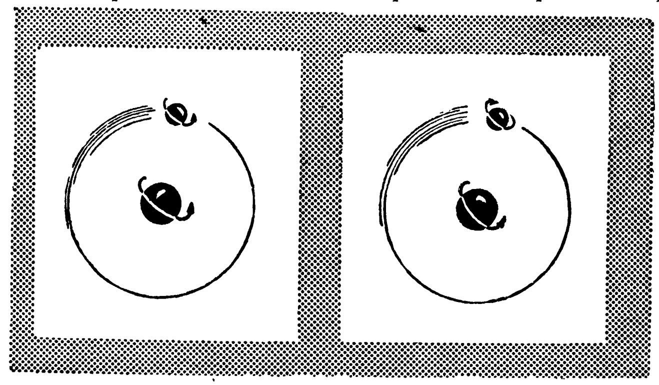
Оказалось, что на волне 21 *см* излучает водород — атомы водорода, рассеянные в межзвездном пространстве.

Мы когда-то считали космическое пространство совсем пустым. Это было ошибочным представлением. В этом пространстве носятся отдельные атомы химических элементов, в частности натрия, водорода. Этих атомов не так уж много, например водорода на 1 $см^3$ приходится всего один-два атома, но ведь космическое пространство бескрайно, поэтому количество водорода в нем неисчислимо велико.

В очерке о молекулярных усилителях было рассказано о механизме излучения атомами и молекулами электромагнитных волн. Такое излучение происходит

при переходе атома или молекулы из энергетического состояния с более высоким уровнем в энергетическое состояние с более низким уровнем. Освобождающаяся энергия и излучается при этом в виде электромагнитных колебаний.

Таков же механизм излучения и атомами межзвездного водорода. Излучение происходит при переходе атома из одного энергетического состояния в другое — с меньшим уровнем. Однако физика этого явления у водорода несколько отличается от той, о которой говорилось в очерке о молекулярных усилителях. У водорода при переходе атома из состояния с одним уровнем энергии в состояние с другим уровнем не происходит перехода электрона (у атома водорода — единственного) с одной орбиты на другую, а изменяется направление вращения электрона. Дело в том, что элементарные частицы вращаются вокруг собственной оси. Это вращение называется спином. У атома водорода при изменении энергетического состояния изменяется спин электрона. Спин есть и у ядра атома водорода — протона и у его электрона. Если спины ядра и электрона направ-



лены в одну сторону, то их магнитные моменты складываются и энергия атома увеличивается. Если направление спина электрона изменится, то магнитные моменты ядра и электрона будут вычитаться и энергия атома уменьшится. Квант энергии, который при этом выделяется, соответствует электромагнитной волне длиной 21 *см.* (Энергия электромагнитной волны определяется только ее частотой, так как скорость движения волны постоянна.)

Количество излучаемой энергии (длина излучаемой волны) могло бы изменяться, если бы атомы были связаны в системы (см. очерк о молекулярных усилителях), но в межзвездном пространстве атомы крайне редки и ни о какой связи их не может быть и речи, поэтому излучаемая волна строго постоянна. Количество вещества в межзвездном пространстве не везде одинаково. В нем есть места скопления пыли, есть туманности, количество вещества в которых определяется 10^{-21} *г/см*³ (около 1 000 атомов в 1 *см*³); в наиболее «пустых» местах по предположениям один атом приходится на 15 *см*³. Это соответствует «давлению» $2{,}5 \cdot 10^{-21}$ атмосферы, а длина свободного пробега, т. е. пробега между столкновениями с другими элементарными частицами, составляет примерно $32 \cdot 10^9$ *км*.

Для того чтобы атом водорода излучил электромагнитное колебание, он должен подвергнуться воздействию энергии извне, например энергии электромагнитных волн. Теория говорит, что при воздействии квантов энергии нужной величины на атомы или молекулы, имеющие разные энергетические уровни, совершенно одинакова вероятность захвата дополнительной энергии молекулами, находящимися на низшем уровне, или излучения энергии молекулами, находящимися в активном состоянии (имеющими избыток энергии). Поэтому одни атомы водорода теряют избыток энергии, а другие приобретают его, причем их относительное количество не изменяется.

Подсчитано, что изменение энергетического уровня молекулы межзвездного водорода происходит крайне редко — примерно 1 раз в 11 млн. лет. Но крайняя редкость этого процесса у одного атома перекрывается их громадным количеством, поэтому радиоголос межзвездного водорода слышен всегда и везде.

НОВЫЙ МЕТР, РОЖДЕННЫЙ РАДИОТЕХНИКОЙ

В конце прошлого века в науке и технике произошло событие, которое касалось не только ученых и инженеров, но по существу всех людей: была введена новая единица длины — метр, послужившая исходной базой для подавляющего большинства других единиц. Было покончено со всевозможными футами, локтями и четвертями, выведенными из размеров каких-то «усредненных» частей человеческого тела. Метр был физически обоснован. Со всей возможной тогда точностью была измерена длина меридиана, проходящего через Париж, и одна сорокамиллионная часть этого меридиана была названа метром. Преимуществом такой физической базы метра считалось то, что при утере эталона метра его величина снова могла бы быть восстановлена путем измерения соответствующего меридиана.

Некоторое время казалось, что проблема создания единицы длины окончательно решена. Но повторные измерения парижского меридиана показали, что установленная величина метра неверна. Стало также очевидно, что продолжать измерения не имело смысла, потому что каждый раз благодаря совершенствованию техники будут получаться новые результаты. Следовательно, метр, а вместе с ним и большое количество других единиц придется периодически изменять и, что самое главное, в случае утраты эталонов их нельзя будет восстановить в первоначальной величине.

Поэтому в 1872 г. Международная комиссия предложила отказаться от метра как «естественной» единицы и условиться считать единицей длины парижский экземпляр эталонного метра. Этот эталон и был утвержден в 1889 г. Генеральной конференцией по мерам и весам.

Все это как бы выбило из-под метра его физическую базу. Неудобство этого положения было ясно всем, но наука не могла предложить взамен ничего такого, что

поддавалось бы сравнительно легкому и точному измерению и гарантировало бы безусловную повторяемость результатов измерений. Найти такую удобную природную базу единицы длины стало возможным лишь в наши годы в связи с успехами радиоэлектроники. В очерке о молекулярных усилителях и генераторах (стр. 225) было подчеркнуто необычайное постоянство длины волны электромагнитных колебаний, излучаемых атомами и молекулами при переходе из одного энергетического состояния в другое при условии, что эти атомы или молекулы не входят в связанные системы.

И вот в октябре 1960 г. Конференцией по мерам и весам было узаконено новое определение метра: метр равен 1650763,73 длины волны электромагнитных колебаний, излучаемых в вакууме изотопом криптона с атомным весом 86, которые соответствуют оранжевой линии его спектра.

Так радиоэлектроника помогла метрологии. Этот пример может служить прекрасным подтверждением существующей теперь теснейшей взаимосвязи и взаимозависимости между различнейшими областями естествознания и техники и все возрастающей роли радиоэлектроники в их объединении и развитии.



Застывшие заряды

Каким образом электрические заряды могут застыть? Ведь они отличаются исключительной подвижностью. Именно на этом их свойстве основана работа электронных приборов, которым обязаны грандиозные успехи современной техники.

И второй вопрос: чем может быть полезно то, что заряды застынут? Застывший заряд неподвижен, неуправляем, а ведь как раз движение зарядов и управле-

ние их движением являются основой работы электронных и электрических устройств.

Тем не менее все же заряды могут застывать и в таком виде приносят несомненную пользу, упрощая решение многих технических задач.

Движущийся заряд создает в окружающем пространстве магнитное поле. Такое поле образуется вокруг провода, по которому течет ток. Если свить провод в катушку, то магнитное поле усилится, а если внутрь катушки поместить железный сердечник, то он превратится в магнит с очень сильным полем. Такие устройства — электромагниты — во всевозможных разновидностях применяются исключительно широко.

Но для поддержания электромагнита в рабочем состоянии нужно беспрерывно пропускать по его обмотке электрический ток. Это далеко не всегда бывает рационально. В очень многих случаях было бы удобно получать магнитное поле, не затрачивая электроэнергии.

Мы знаем, что это возможно. Существуют постоянные магниты. Они создают в пространстве вокруг себя неизменное магнитное поле, на поддержание которого не нужно затрачивать энергию. В результате электромагниты применяются только тогда, когда это действительно необходимо, в других же случаях они заменяются постоянными магнитами.

Было бы очень удобно иметь прибор, создающий столь же неизменное электрическое поле. Принципиально это кажется легко осуществимым. Любой электрический заряд возбуждает вокруг себя электрическое поле. Чтобы получить поле достаточно осязаемой величины, надо только сконцентрировать в одном месте некоторое количество одноименных зарядов. Но в действительности это сделать крайне трудно.

В проводниках заряды очень подвижны, разделить их легко, приложив к проводнику электрическое поле. Но вследствие своей подвижности заряды, после того как будет снято поле, моментально распределятся равномерно по всему объему проводника, заряды разных знаков «перемешаются» и никакого внешнего поля у проводника не будет. Можно было бы пойти на хитрость и, разделив заряды разных знаков, поместить между ними изолятор. Таким прибором мы пользуемся — это конденсатор. Он очень полезен, но это совсем не то, что маг-

нит. Магнит сохраняет намагниченность годами и десятилетиями, его можно замыкать железом и т. д. Магнит можно испортить только сильным нагреванием и резкими ударами, вообще же это очень постоянный прибор. Совсем не то конденсатор. Сконцентрированные на его пластинах заряды утекают при первой возможности. Разряд конденсатора произойдет моментально при касании его пластин проводником. Но если короткого замыкания и не произойдет, то конденсатор все равно разрядится через несколько суток через воздух, через влажную пленку, образующуюся на изоляторе, и пр.

В изоляторе заряды не могут свободно передвигаться, но зато там их нельзя и разделить. Поле, приложенное к изолятору, не произведет разделения имеющихся в нем зарядов. В полупроводнике заряды могут с трудом передвигаться, их можно разъединить полем, но после снятия поля они скоро снова растекутся равномерно по всему объему полупроводника.

Таким образом, ни проводники, ни полупроводники, ни изоляторы не дают возможности изготовить путем разделения зарядов электрическое подобие магнита. Для создания постоянного электрического поля, для удерживания электрических зарядов разделенными приходилось непрерывно затрачивать энергию: химическую в гальванических элементах и аккумуляторах, механическую в динамомашинах, тепловую в термоэлементах и т. д.

Но все же в конце концов задачу удалось решить. Уже более 200 лет назад (в 1756 г.) профессор Петербургского университета Ф. Эпинус при исследовании пироэлектрических явлений заметил, что кристаллы турмалина при охлаждении задерживают электрические заряды. Длительное изучение подобных явлений многими учеными, в том числе Фарадеем, позволило установить, что в известной степени «заморозить» разделенные заряды можно при переходе некоторых веществ из жидкого состояния в твердое. Задержание зарядов происходит лучше всего, если к некоторым воско- и смолообразным материалам подвести напряжение, когда они расплавлены и помещены между двумя проводящими обкладками, и поддерживать это напряжение все время, пока взятые материалы не затвердеют. Когда затвердевание наступит, можно будет снять напряжение и отнять

обкладки — заряды на поверхности материала останутся и, следовательно, будут создавать в окружающем пространстве электрическое поле. Заряды не исчезают даже в случае короткого замыкания.

Приборы такого рода получили название электретов, но уровень техники того времени не позволял найти практическое применение этому свойству некоторых материалов.

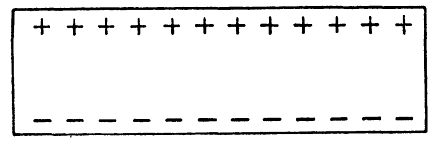
В наши дни изучению электретов было уделено большое внимание. Было найдено несколько способов изготовления электретов.

Термоэлектреты получались в результате уже упомянутого затвердевания расплавленного материала в электрическом поле.

Для изготовления фотоэлектретов вместо нагревания и последующего охлаждения применяется облучение светом.

Электроэлектреты можно изготовить путем приложения электрического напряжения к некоторым (немногим) веществам без их нагревания или освещения.

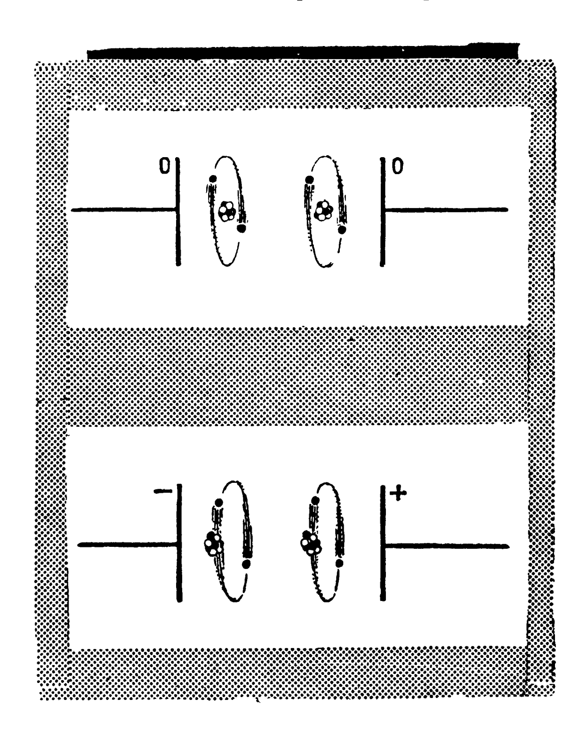
Наконец, найден еще и четвертый способ изготовления электретов, которые назвали псевдоэлектретами. Приставка «псевдо» относится не к существу прибора, не к его действию, а лишь к физике получения «электронного эффекта». У «настоящих» электретов разделенные заряды образуются в результате внутренних процессов, а у псевдоэлектретов заряды сообщаются материалу извне путем облучения альфа, бета- или гамма-лучами. Название, по-видимому, не совсем удачное, так как фотоэлектреты надо в таком случае тоже отнести к группе «псевдо».



Физические процессы, происходящие в электретах, еще не ясны до конца, но уже предложено несколько гипотез, удовлетворительно объясняющих эти процессы.

По одной из гипотез электроны или ионы, приобретающие в жидком материале подвижность, в той или иной степени концентрируются так, как заставляет их делать это приложенное электрическое поле, а затем, по затвердении материала, они не могут перераспределиться.

Согласно другой гипотезе, электронные оболочки атомов несколько смещаются относительно ядра, вследствие чего нейтральный атом превращается в диполь. Это явление подобно поляризации атомов твердого диэлектрика в конденсаторах. После снятия поля поляризация атомов в электретах сохраняется.



Третья гипотеза относится к таким веществам, которые образованы из поляризованных молекул. Эти молекулы в обычном состоянии ориентированы хаотически, и их поля взаимно уничтожаются. При подведении поля к жидкому материалу молекулы в какой-то степени ориентируются в соответствии с ним и по затвердевании материала остаются в таком положении.

Несколько яснее картина в отношении фотоэлектретов: здесь, очевидно, происходит выбивание электронов из атомов наподобие внутреннего фотоэффекта у фотоэлементов. У псевдоэлектретов, получаемых чаще всего

при облучении электронами (бета-лучами), электроны входят на некоторую глубину в материал и застревают в нем.

Действительная картина процессов, происходящих при формировании электретов, часто бывает затемнена тем, что это формирование обусловлено не одним каким-нибудь способом, а двумя или больше одновременно. Этим, по-видимому, объясняется то, что некоторые электреты после формирования имеют одну полярность, а через некоторое время меняют ее на обратную. В таком случае механизм образования электрета двоякий, причем один из них обусловливал полярность одного направления, а второй способ — другого направления. Вначале полярность электрета по величине равна разности напряжений обеих полярностей и имеет знак большей. Затем первая полярность перестала существовать, и осталась только вторая.

Естественно, что образовавшаяся в итоге того или иного процесса разность потенциалов на концах электрета не исчезает и при коротком замыкании. Если электрет замкнуть проводником, то по нему ток не пойдет, так как заряды электрета вследствие своей неподвижности не могут переходить в провод.

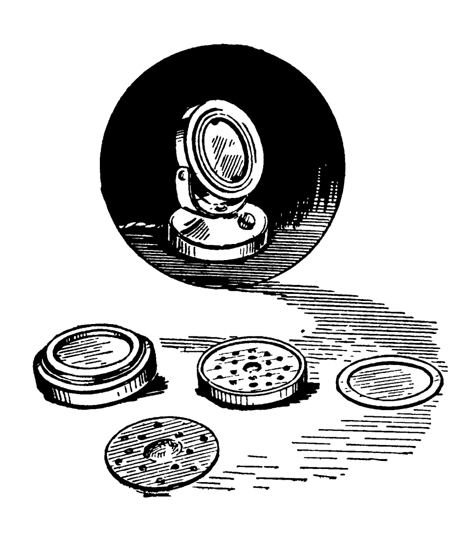
Электреты подобны магнитам в отношении возможности деления на части. Как каждый кусок разломанного магнита тоже является магнитом, так и куски разломленного электрета имеют электрическую полярность и создают электрическое поле.

Первые электреты делались из смеси карнаубского воска (растительный воск, покрывающий листья одного из видов бразильской пальмы), смолы и небольшой прибавки пчелиного воска. В дальнейшем было найдено много веществ, обладающих свойством электретов; к ним относятся, например, плексиглас, сахар, слюда, эбонит, сера, титанат цинка, титанат кальция, титанат бария, стеатит, нафталин и др. Современные электреты часто делаются из керамики.

Практическое применение электретов, по существу, только начинается, но оно уже весьма разнообразно.

Постоянное электрическое поле, создаваемое электретом, позволяет с успехом применять их для изготовления микрофонов и телефонов. Микрофон состоит из плоского электрета и расположенной на очень малом

расстоянии от его поверхности (около 0,1 *мм*) мембраны. В мембране, находящейся в поле электрета, вследствие индукции будет наводиться напряжение. Доходящие до микрофона звуковые волны заставят мембрану вибрировать, отчего на ней возникнет переменное напряжение. Звуковая энергия будет преобразована в электрическую, через нагрузочное сопротивление в цепи



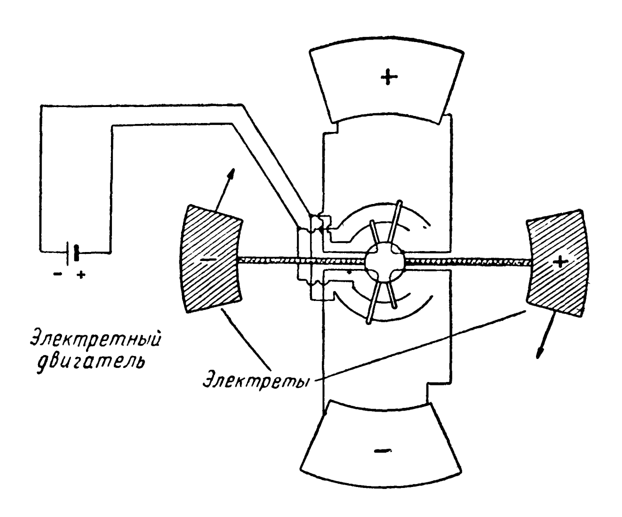
мембраны потечет переменный ток звуковой частоты и т. д.

Такой электретный микрофон не нуждается в источнике тока, он может работать и как телефонная трубка, т. е. является обратимым прибором.

С электретными микрофонами-телефонами связана интересная история. Во время второй мировой войны американцы обнаружили на одном захваченном японском военном корабле странный телефон — он работал без источников тока. Отсутствовали в нем также магниты и обмотки. Только впоследствии было выяснено, что основой японского микрофона и телефона служил электрет, работа которого определялась новыми, неизвестными дотоле физическими явлениями.

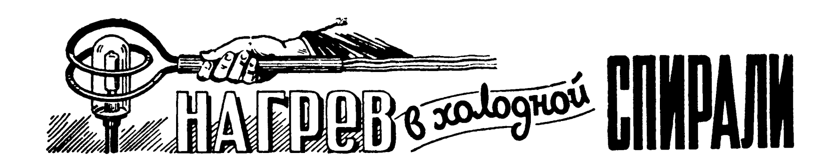
Возбуждение в проводнике напряжения во время приближения к электрету и удаления от него исполь-

зуется для различных устройств: вибродатчиков, генераторов высокого напряжения, электродвигателей и др. Электреты используются для изготовления фильтров для очистки газов, дозиметров проникающей радиации, измерителей атмосферного давления, электрометров и т. д. Электреты дают возможность делать запоминающие устройства и даже. . . фотографии — электрические фотографии, не нуждающиеся в химикалиях. В общем, как невозможно перечислить все случаи при-



менения постоянных магнитов, так нельзя и привести перечень всех уже реально опробованных и в значительной части эксплуатирующихся применений электретов.

Электреты, транзисторы, ферриты, молекулярные усилители, параметрические усилители и многие другие новинки последних лет являются элементами радиоэлектроники будущего, характерной малыми размерами устройств, высокой надежностью и экономичностью, большой точностью и огромной отдачей.



Обязательным условием хорошей работы радиолампы является высокий вакуум. Но для того чтобы обеспечить нужную степень вакуума (см. стр. 53), недостаточно только откачать из баллона лампы воздух. В металле, из которого сделаны электроды лампы и их держатели, содержится довольно много газов: кислорода, водорода, азота и др. Их называют окклюдированными газами.

С течением времени, в особенности в связи с неизбежным при работе лампы нагревом электродов, окклюдированные газы выделяются из металла, вакуум ухудшается и лампа перестает работать нормально.

Составить представление о количестве содержащихся в металле газов можно по такому примеру: если из 1 *мм*³ никеля, часто служащего материалом для изготовления анодов ламп, удалить весь окклюдированный в нем газ, то этот газ при нормальном атмосферном давлении займет объем 100 *мм*³.

Лучше всего освобождать металл от газов нагреванием, но нагрев надо производить в уже откачанном баллоне, продолжая откачку по мере выделения газа. Как же это сделать?

На вакуумных заводах нагрев электродов осуществляют очень простым и эффективным способом. На баллон лампы, находящейся на откачном станке, надвигается спираль из нескольких витков медной трубки, и все металлические части, находящиеся внутри баллона, почти моментально раскаляются докрасна. Температура их доходит до 1 000° С. При таком сильном нагреве из металла выделяется весь газ, который сейчас же откачивается насосом. Вакуум лампы теперь обеспечен.

Но что же это за чудодейственная спираль? Попробуем осторожно прикоснуться к ней рукой. Странно, на ощупь она совсем холодная. В ее внутреннее пространство тоже можно поместить палец без всякого опасения — палец никакого тепла чувствовать не будет. Но если у Вас на палец надето кольцо, то Вам этот опыт

проделать нельзя: кольцо немедленно раскалится и обожжет палец.

Секрет удивительной спирали, накаливающей докрасна металлы и совершенно холодной на ощупь, прост. По спирали пропускаются токи высокой частоты. Для поля, создаваемого этой спиралью, стеклянная колба и пустота внутри нее не являются преградой. Создаваемое спиралью быстропеременное магнитное поле пересекает металлические предметы, находящиеся в зоне его действия, вследствие чего в них развиваются столь сильные вихревые токи, что металл раскаляется. Но наше тело магнитное поле не нагревает: из-за большого сопротивления в нем не могут возникнуть сколько-нибудь значительные токи, поэтому мы можем безнаказанно помещать руку внутрь спирали.

Метод нагрева токами высокой частоты с его замечательными возможностями был перенесен из вакуумной промышленности в другие отрасли народного хозяйства, где он находит все более широкое применение.



Не думайте, что эта проблема, во-первых, очень проста и, во-вторых, не имеет никакого отношения к радиотехнике.

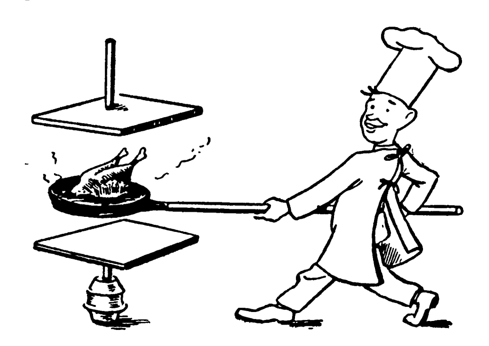
У нас есть холодная котлета. Как ее разогреть?

С технической точки зрения это делается очень примитивно. Котлету кладут на сковородку и помещают на огонь. Огонь нагревает сковородку, сковородка нагревает прилегающий к ней поверхностный слой котлеты. От этого слоя тепло медленно — в силу малой теплопроводности материала — распространяется внутрь котлеты. Для ее прогревания, даже при условии частого перевертывания, требуется много времени. А поверхностный слой котлеты в это время пересыхает, пережаривается, превращается почти в уголь. Вкус котлеты ухудшается.

Можно ли сделать так, чтобы котлета моментально прогревалась вся насквозь, не покрываясь коркой и не теряя вкуса?

Развитие радиотехники позволило расширить эту кулинарную проблему. Такой удобный и хороший способ разогрева можно осуществить при помощи токов высокой частоты, причем огромная ценность высокочастотного нагрева, разумеется, определяется отнюдь не только его кулинарными применениями.

Токи высокой частоты все глубже проникают в самые различные отрасли народного хозяйства. При этом ряд своеобразных особенностей, свойственных высоким



частотам, позволяет применять их для противоречивых на первый взгляд целей.

Сравним, например, такие две области использования токов высокой частоты, как закалка стальных изделий и сушка дерева.

Сущность закалки заключается, как известно, в том, чтобы резко повысить твердость и прочность изделия на поверхности, сохранив в то же время без изменения глубинные слои металла — «сердцевину» изделия, иначе металл станет хрупким. Высокочастотная закалка отлично справляется и с этой задачей, позволяя раскалить до нужной температуры только тонкий слой металла у самой поверхности, не нагревая при этом его внутренних слоев. По качеству закалки и производительности этот новый метод оставляет далеко позади старые термические методы закалки металла, применявшиеся в течение веков.

В другой области — области прогрева и сушки неметаллических материалов, например дерева (и котлеты

тоже), ставится противоположная задача: прогреть материал одинаково равномерно по всей его глубине. И эта задача оказались по плечу токам высокой частоты: высокочастотная сушка дерева как по качеству обработки, так и по сокращению количества времени, необходимого для нее, дает несравненно лучшие результаты, чем все другие тепловые способы, применяемые для этой цели.

Как же удается заставить токи высокой частоты выполнять такие совершенно различные требования?

Дело здесь в том, что в технике высоких частот мы можем отдельно использовать магнитные и электрические поля. В катушке колебательного контура энергия переходит в магнитное поле, а в конденсаторе — в электрическое. Когда в катушку, по которой проходит сильный ток высокой частоты, помещают предмет из стали, высокочастотное магнитное поле вызывает появление в нем вихревых токов такой же частоты. Но вследствие поверхностного эффекта эти токи распространяются только в верхнем слое металла, а в глубине они резко ослаблены или даже вообще отсутствуют. В результате из-за разогрева этими поверхностными токами у стального изделия образуется как бы раскаленная докрасна рубашка. Происходит все это очень быстро, и даже, несмотря на высокую теплопроводность металла, в глубину нагрев распространиться не успевает. После резкого охлаждения раскаленного слоя на поверхности изделия остается твердый износоустойчивый покров, сердцевина же никаких структурных изменений не претерпевает, металл там сохраняет свою вязкость.

Подбирая частоту тока, можно прокаливать металл на разную глубину. Чем ниже частота, тем глубже закалка.

Глубина закаливаемого слоя, *мм*	Частота, *кгц*
0,5—1	$5 \cdot 10^5 - 10^6$
1—2	$10^5 - 3 \cdot 10^5$
2—5	15
3—8	2
8—15	0,5

Если в ту же катушку поместить кусок дерева или какого-либо другого неметаллического материала, то с ним ничего не произойдет — магнитное поле его не нагреет.

Иная картина получится, если дерево будет помещено между обкладками конденсатора колебательного контура. Быстропеременное электрическое поле приводит к появлению в неметаллических материалах диэлектрических потерь, которые вызываются, с одной стороны, токами проводимости, возникающими в таких материалах вследствие несовершенства их изоляционных свойств, а с другой — «трением» между молекулами, которые меняют свое положение внутри вещества при каждой перемене направления электрического поля. Чем выше частота тока, тем больше диэлектрические потери этих видов.

В отличие от токов высокой частоты в металлах, которые распространяются в основном только по поверхности, диэлектрические потери имеют место во всей толще материала, а следовательно, и прогрев его происходит равномерно по всей толщине. В этом заключается главнейшее отличие такого способа нагрева от всех других методов, основанных на использовании внешнего тепла; там нагрев начинается снаружи, и тепло лишь постепенно проникает внутрь тела. Преимущества такого «сплошного» прогрева огромны: он позволяет во много раз сократить время сушки и прогрева и почти полностью устранить брак, который был неизбежен при применении прежних методов из-за неравномерности нагревания по толщине (например, растрескивание дерева). Этот способ позволяет почти моментально разогреть и котлету, разогреть сразу по всей ее толщине.

Для сушки и прогрева неметаллических материалов — дерева, пластмасс и многих органических веществ — применяются токи значительно более высоких частот, чем для закалки, примерно от 300 *кгц* до 20 *Мгц*, а в отдельных случаях даже до 100 *Мгц*. Выбор частоты зависит от назначения высокочастотной установки. Например, для сушки дерева хорошие результаты дают частоты 300—500 *кгц*, для предварительного прогрева пластмасс перед прессованием — 20—40 *Мгц*, а для склеивания плоских слоистых пластмасс типа гетинакса и текстолита — еще более высокие частоты: 40—100 *Мгц*.

Чем лучше изоляционные свойства прогреваемого материала, тем более высокая частота тока нужна, чтобы вызвать в материале достаточно большие диэлектрические потери.

Так, используя в отдельности магнитное и электрическое поля, создаваемые токами высокой частоты, можно получить при помощи них самые различные и — на первый взгляд — противоположные по своему характеру результаты.

* *
*

Чрезвычайно быстрое развитие техники в наше время дает интересную возможность на протяжении сравнительно немногих лет проследить, как техническая шутка превращается в более или менее обоснованный прогноз, а последний очень быстро реализуется. Карикатура-шутка, помещенная на стр. 260, заимствована из журнала «Радио» за 1947 г. 15 лет назад идея использования токов высокой частоты для кулинарных целей могла быть выражена только в виде шутки. В первом издании настоящей книги эта идея была уже вынесена в заголовок очерка о применении токов высокой частоты. А вот теперь, когда было уже сверстано второе издание «Занимательной радиотехники», в газете «Вечерняя Москва» появилась заметка

На ВДНХ

Чудо-печь

Приготовить праздничный обед на десять человек за двенадцать с половиною минут — ведь это непосильно ни для самой опытной хозяйки, ни даже для кулинара-виртуоза.

Между тем, такую задачу решили люди, далекие от кулинарии. Группа работников Научно-исследовательского института токов высокой частоты создала опытный образец чудо-печи. Гуся, утку, курицу можно зажарить в ней за шесть минут, сварить килограмм мяса — за две с половиною минуты и за четыре минуты испечь килограммовый бисквит.

Приготовить пищу с такой быстротой помогают токи сверхвысокой частоты.

Чудо-печь демонстрируется в павильоне Российской Федерации ВДНХ. Первые четыре такие печи скоро появятся на предприятиях общественного питания. (ТАСС).

(«Вечерняя Москва», № 183 от 6 августа 1962 г.)

Цена 65 коп.